TÉCNICA

Revista de Engenharia

Publicação trimestral

de investigação científica e desenvolvimento

nº3/96 Setembro 96

ISSN 0040-1714

pvp 600.00

COMISSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES

VERIFICAÇÃO DE GARANTIAS

CARACTERIZAÇÃO DE EMISSÕES GASOSAS

ENSAIOS COMPLEMENTARES DE INSTALAÇÕES

APOIO À EXPLORAÇÃO

GESTÃO DA MANUTENÇÃO

Design e concepção gráfica: PROET Direcção Comercial e de Informação

GRUPO EDP

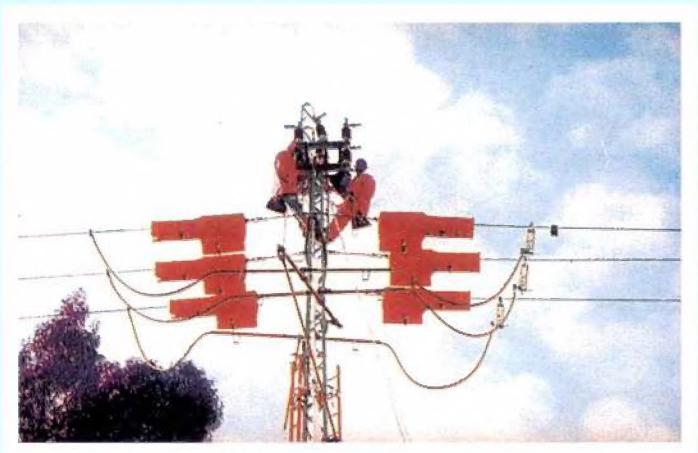
PROET

Projectos, Engenharia e Tecnologia, S.A.

Av. Estados Unidos da América, 55
1700 LISBOA - PORTUGAL
Tel. (351.1) 847 01 80 - Fax. (351.1) 840 94 19
(http://wwwproet.edinfor.pt)

do projecto à exploração, um serviço global

mateace
ELECTRICIDADE, S.A.



Manutenção de Seccionador em 15kV em Tensão

ENGENHARIA

PROJECTOS

MONTAGENS

MANUTENÇÃO

CONSULTADORIA

- Trabalhos em tensão (TET BT/MT)
- Redes Aéreas e Subt. de BT.MT e AT
- Postos de transformação
- Coogeração de energia
- Instalações Industriais
- Loteamentos
- Utilização Racional de Energia Eléctrica (UREE)
- Equipes de Contagem e Telemedida
- Topografia
- Termografia
- Iluminação
- Fabrico e comercialização de Sinalizadores para Linha Aéreas

SEDE: Rua Padre Manuel Bernardes, 85 Padrão da Légua 4465 - São Mamede de Infesta (Armazém) Telefs.: (02) 953 63 35/6 - 953 64 09 Fax (02) 951 67 41

índice

Editorial 3

ARTIGO CONVIDADO

Edifícios Inteligentes: Conceitos e Serviços: Renato Nunes, Carlos Sêrro 5

COMUNICAÇÕES CIENTÍFICAS

Sistemas Catalíticos V_2O_5/TiO_2: Cristina R. Dias M. Farinha Portela 17

Controlo e Previsão de Avarias em Motores de Avião: F. Alves, A. Estêvão Cadeias e P. Rosa Pereira 23

Salinidade Atmosférica: Imagens de intrusão ao nível do solo numa zona-piloto do Litoral Alentejano: A.M.G. Pacheco, A.J. Sousa, V. Marques, R. Figueira, F. Catarino, C. Branquinho 31

Método de VODC: Método Alternativo ao método dos Multiplicadores indeterminados de Lagrande para sistemas Anholónomos: Óscar João Campos Dias e Vitor Manuel dos Santos Cardoso 39

Atomização de líquido em injectores para baixa produção de poluentes: Isabel S. Carvalho e Manuel V. Heitor 47

FICHA TÉCNICA:

TÉCNICA, Revista de Engenharia
Publicação trimestral - p.v.p. 600$00
distribuição gratuita aos sócios da AEIST e aos docentes do IST
ISSN 0040-1714
Depósito legal 85 962/95
Registo de Imprensa 101407

Propriedade
Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, P – 1000 Lisboa, Portugal
Contrib. N.º 501 055 606

Administração, Serviços Comerciais e Assinaturas
Av. Rovisco Pais, P - 1000 Lisboa, Portugal
Telef: 351 -1- 848 10 18/841 74 10
Fax: 351 -1- 847 40 14/849 92 47
Correio Electrónico – aeistdoc © eta.ist.utl.pl

Direcção
Director Científico: Manuel Abreu Faro
Director Executivo: Nuno Catarino
Vogais: Diogo Gomes, João Paulo Santos e João Santos
Secretariado e Produção: Paula Carvalho

Concepção Gráfica
Traça Design
Praça da Alegria, 6 - 2.º Esq. – 1200 Lisboa
Telef: (01) 343 13 21
Fax: (01) 343 13 24

Publicidade
Dossier Comunicação e Imagens, Lda.
R. Eça de Queirós, 18 – 2.º Lisboa
Telef: (01) 355 92 94/5 – 353 73 21
Fax / Telef: (01) 353 73 16

Execução Gráfica
Gráfica Maiadouro, S.A.
VERMOIM – 4470 Maia
Telef. (02) 948 02 45/948 88 05
Fax: (02) 948 77 07
Delegação em Lisboa
Telef. (01) 796 92 10/795 53 00
Fax: (01) 796 92 79
Tiragem: 5000 ex.

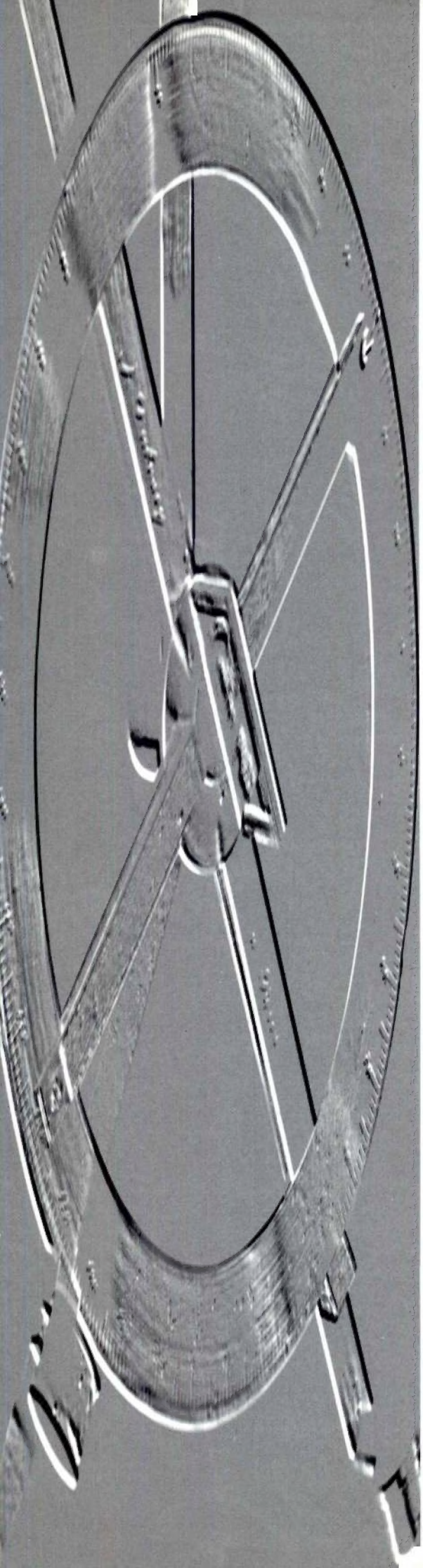
TIB / Jean Pierre Horlin

Apoio
Conselho Directivo do Instituto Superior Técnico

TÉCNICA
Revista de Engenharia
Publicação trimestral
de investigação científica e desenvolvimento

Aqui poderia estar um anúncio seu.

Para mais informações contacte-nos pelos telefs.: (01) 355 92 94/5 - 353 73 21 – Fax/Telef.: (01) 353 73 16
ou escreva-nos para: DOSSIER, comunicação e imagem, Lda., R. Eça de Queirós, 18-2.° – 1000 LISBOA



EDITORIAL

Faltam-nos dois números
dos quatro que são em cada ano.
Preenchidos, transbordando já,
para 1997,
são e dão sinal de vida.
Foi-nos grato, participar, activamente, nas comemorações
dos 85 Anos do I.S.T.:
Ensino, Investigação, Desenvolvimento
Técnica n.º 2/96 – Junho de 96
Não há preceitos maiores,
há preceitos grandes.
Um deles é o da gratidão
a quem nos tornou e torna
materialmente possíveis.
Merecedor, inteiramente merecedor,
dêsse sentimento
é o Conselho Directivo do Instituto.
Também aqueles que nas páginas
da Revista
nos deixam:
pensamento, saber, experiência.
O que se fez até ontem
trouxe-nos até hoje, não mais.
Lembramos e respeitamos o passado
mas não vivemos dêle.
Para que nos continuemos
e, como sempre,
fiéis aos ideais da Investigação,
a Técnica é e oferece
um espaço aberto
onde se pede saber e rigor
e se respeita a liberdade da ideia e do pensamento,
se acarinha e encoraja o que é novo.

aeist

Associação dos Estudantes do
Instituto Superior Técnico

Secção de Folhas

Somos especialistas em fotocópias de qualidade!

Fotocópias a cores e a preto.

Encadernações e plastificações.

Impressão rápida e entrega imediata.

Temos os melhores preços do mercado!

Contacte-nos!

Av. Rovisco Pais
1000 Lisboa

Tel.: 848 08 80
Fax: 848 40 14

Palavras chave: Edifício Inteligente, Serviço, Interacção entre serviços.

EDIFÍCIOS INTELIGENTES: CONCEITOS E SERVIÇOS

Renato Nunes, Carlos Sêrro
DEEC, IST/INESC

RESUMO

Apresenta-se neste artigo o conceito de edifício inteligente de um ponto de vista funcional, realçando a estrutura dos serviços que o integram, as suas funções básicas e as suas interacções. Em particular, chama-se a atenção para os enormes potenciais, em termos de valor acrescentado, que é possível retirar deste conceito. Uma visão abrangente como a que aqui é apresentada faz ressaltar como noções fundamentais a integração, a flexibilidade, a adaptabilidade e a capacidade de oferecer um suporte eficaz à actividade das organizações sediadas no edifício.

ABSTRACT

In this paper, the concept of Intelligent Building is presented from a functional point of view. Emphasis is put on the structure of the underlying services, their basic functional behaviors, and their interactions. In particular, the value added to the overall system as a consequence of the implementation of concepts such as integration, flexibility, and adaptability is put forward. Such fundamental concepts allow an efficient support to organizations residing in the building.

1. INTRODUÇÃO

Nas sociedades modernas, os custos de construção e de manutenção dos edifícios urbanos são em geral muito elevados, constituindo gastos significativos para as empresas que os possuem e/ou utilizam. Não surpreende, por isso, que a tentativa de redução desses gastos tenha por vertente principal a racionalização do projecto e da exploração dos edifícios. Assim, a partir da década de 80 surge o conceito *de Edifício Inteligente,* essencialmente como resposta à necessidade premente de redução de custos de construção e de exploração. Aparecem então os chamados Sistemas de Gestão Técnica que dissectam os edifícios em componentes essencialmente estanques de controlo de funções de equipamentos muito diversificados, pertencentes a fabricantes também muito diferentes.

Com os Sistemas de Gestão Técnica dos edifícios da década de 80 aparecem essencialmente dois fenómenos novos. Por um lado, surge o conceito de *serviço* ligado à função ou funções desempenhadas pelos diversos equipamentos de gestão técnica: o serviço de iluminação, o serviço de controlo de acessos ou o serviço de detecção de incêndios. Por outro lado, aparece a necessidade de *integração* dos serviços, com o objectivo de extrair novas potencialidades resultantes das suas interacções.

No início da década de 90 surge, assim, um conceito mais alargado de edifício inteligente, onde a integração de serviços começa a desempenhar um papel primordial. O serviço de controlo de acessos dialoga com o serviço de apoio à portaria; este, por sua vez, recebe informação de e transfere informação para o serviço de vigilância, etc. A dificuldade encontrada reside, naturalmente, na impossibilidade prática de realizar todas as integrações desejáveis: cada fabricante de equipamentos para edifícios inteligentes especializa-se num determinado subconjunto de serviços, e os seus equipamentos apenas dialogam entre si, mas nunca ou quase nunca com os equipamentos de outros fabricantes. Formam-se soluções fechadas e parciais, por isso incompletas. A pressão exercida pelos projectistas, construtores, administradores e utentes está presentemente a gerar um movimento cuja finalidade última consiste na exploração de sinergias novas resultantes da integração de serviços já conhecidos e na criação de novos serviços nos edifícios inteligentes.

É objectivo deste artigo apresentar a evolução dos edifícios inteligentes de um ponto de vista funcional, dando ênfase aos serviços e às suas interacções e chamando a atenção para os enormes potenciais em termos de valor acrescentado que é possível retirar destes conceitos.

Na secção 2 é descrito o conceito de edifício inteligente, sendo defendida uma visão abrangente e multidisciplinar em que ressaltam como noções fundamentais a integração, a flexibilidade, a adaptabilidade e a capacidade de oferecer um suporte eficaz à actividade das organizações sediadas no edifício.

Na Secção 3 apresenta-se um conjunto de serviços para edifícios inteligentes, realçando-se o conceito de serviço e ilustrando-se algumas das suas principais interacções.

2. OS EDIFÍCIOS INTELIGENTES

2.1. A Evolução dos Edifícios e o seu Impacto Económico

Desde que o Homem se tornou sedentário que as habitações foram usadas como meio de abrigo e de protecção. Com os avanços da civilização surgiram os edifícios onde grupos de pessoas se reunem e comunicam, onde são estabelecidas relações de colaboração formais e informais, onde são realizadas tarefas em grupo e onde são mantidos repositórios de informação. Os edifícios tornaram-se, assim, o cerne das actividades de negócio e constituem hoje a base da vida urbana.

À medida que os edifícios foram evoluindo nas suas múltiplas vertentes, foram-se destacando as suas instalações técnicas, cuja complexidade tem vindo sempre a aumentar. Os vários equipamentos técnicos eram, inicialmente, controlados individualmente. Foi no início dos anos 60 que sugiram os primeiros sistemas de controlo centralizado nos edifícios, com especial incidência sobre os equipamentos de climatização.

No princípio da década de 70, a divulgação dos microprocessadores alargou o domínio de aplicação dos sistemas de controlo, os quais passaram a permitir a automação e a supervisão de equipamentos mais sofisticados e em maior número. A crise petrolífera de meados da década de 70 contribuiu decisivamente para a implantação destes sistemas, colocando em primeiro plano todos os aspectos relacionados com uma gestão energética mais racional.

Já nos anos 80 surgem novos requisitos de conforto, de segurança, de flexibilidade dos locais de trabalho, e novas e maiores necessidades de serviços de telecomunicações e de processamento de informação. Isso deu origem ao aparecimento, nos edifícios, de três sistemas fundamentais:

- o sistema de automação e gestão de edifícios, responsável pelo controlo das instalações técnicas, pela detecção de incêndios, pela gestão energética, pelo controlo da iluminação, pela climatização, etc;
- o sistema de telecomunicações, envolvendo comunicações de voz e de dados, a comunicação com o exterior dos edifícios, etc;
- o sistema computacional, que inclui sistemas de informação, escritório electrónico, sistemas de apoio à decisão, automação de procedimentos administrativos, etc.

Neste ambiente, caracterizado por uma constante evolução, existem aspectos económicos que importa realçar. O custo dos edifícios é muito grande. A comprová-lo aponta-se o custo das construções novas que, nos EUA, ronda os 10 a 13% do produto nacional bruto [rgei90], sendo ainda maior o custo associado à renovação de edifícios já existentes. Globalmente, os edifícios correspondem a cerca de 5 a 30% do património das empresas, de acordo com [bake93]. Adicionalmente, os custos de exploração de um edifício são, em média, a segunda maior despesa de uma empresa, logo a seguir aos salários dos seus trabalhadores, ainda de acordo com a mesma fonte. Em termos de gastos energéticos, [amil92] relata que os edifícios são um sector em elevado crescimento, sendo responsáveis por 28% do total da energia dispendida e 38% do consumo de electricidade. De notar ainda que um edifício corresponde a um investimento de muito longo prazo, dado que o seu período de vida útil ronda os 40 anos.

Os factos indicados apontam para a necessidade premente de gerir bem o dispendioso património que os edifícios representam e de tirar o máximo proveito deles e dos recursos que disponibilizam.

Foram todos os aspectos referidos e também a própria transformação da sociedade industrial na sociedade informática dos nossos dias, a necessidade de oferecer flexibilidade, de se adaptar a novas tecnologias e a novos requisitos, que deram origem ao aparecimento do conceito de *Edifício Inteligente.*

2.2. A Definição de Edifício Inteligente

Em 1986 foi criada nos EUA a organização *Intelligent Buildings Institute* (IBI), com o objectivo de promover e apoiar todos os aspectos relacionados com os edifícios inteligentes. Uma das suas primeiras missões foi tentar esbalecer uma definição para o conceito. Essa definição, pelo consenso que reúne, indica-se de seguida.

"Um edifício inteligente é aquele que oferece um ambiente produtivo e que é economicamente racional, através da optimização dos seus quatro elementos básicos – estrutura, sistemas, serviços e gestão – e das inter-relações entre eles. Os edifícios inteligentes ajudam os seus proprietários, gestores e ocupantes a atingir os seus objectivos sob as perspectivas do custo, conforto, adequação, segurança, flexibilidade no longo prazo e valor comercial" [ibif87].

Com o objectivo de clarificar e complementar a definição apresentada, descrevem-se em seguida diversos aspectos importantes a ter em atenção.

- A noção de "inteligência" deve estar presente durante todo o ciclo de vida do edifício, sendo particularmente importantes as fases de projecto e de concepção.
- Os aspectos estruturais e organizacionais do edifício têm um grande relevo, devendo prever-se formas simples e fáceis de reorganização do espaço.
- Um edifício inteligente é um edifício à prova de futuro, no sentido de que deverá poder adaptar-se a novos padrões de utilização e a novas necessidades.
- O conceito de edifício inteligente não se restringe a edifícios de escritórios, podendo (e devendo) ser aplicado a outros edifícios tais como: hospitais, edifícios educacionais, hotéis, espaços comerciais, campus universitários, etc.
- O grau de "inteligência" de um edifício não deve ser encarado como algo absoluto. A "inteligência" de um edifício está intimamente associada à forma como são satisfeitas as necessidades e os requisitos das organizações nele instaladas.
- No edifício inteligente a ênfase não se deve centrar apenas nos aspectos do controlo, da automação e da supervisão. A era informática em que vivemos necessita que o edifício dê também um suporte adequado aos sistemas informáticos e às comunicações.
- Um edifício inteligente deve oferecer locais de trabalho que motive as pessoas e que as apoie fortemente nas suas tarefas criativas ou administrativas.
- Um edifício inteligente deve permitir que os trabalhadores intervenham sobre o seu ambiente de trabalho, adequando-o às suas necessidades e preferências.
- Os vários sistemas presentes num edifício inteligente (associados à automação, às comunicações e ao processamento de informação) devem poder interactuar e cooperar entre si, possibilitando novos graus de ges-

tão e supervisão, e um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis no edifício.

A concluir, e procurando sintetizar as diversas noções apresentadas, pode-se afirmar que um edifício inteligente é aquele que foi concebido e construído por forma a oferecer uma grande flexibilidade de utilização, dispondo da capacidade de evoluir, de se adaptar às necessidades das organizações e de oferecer, em cada momento, o suporte mais adequado à sua actividade. Por outro lado, deve possuir sistemas de automação, de computação e de comunicações que possibilitem, de um modo integrado e coerente, gerir de forma eficaz os recursos disponíveis no edifício, potenciando aumentos de produtividade, permitindo poupanças energéticas e oferecendo elevados graus de conforto e de segurança aos indivíduos que nele trabalham.

2.3. As Vantagens da Integração

À medida que os edifícios se tornam mais caros e complexos, e à medida que aumenta o número e a sofisticação dos sistemas tecnológicos que neles se incorporam, torna-se cada vez mais crítico gerir de forma eficaz os edifícios e a sua tecnologia. Neste contexto, é fundamental a noção de *integração*. Ela está associada à capacidade de vários sistemas poderem comunicar entre si, trocarem informação e colaborarem para atingir objectivos comuns.

Considerando os principais domínios tecnológicos do edifício – automação, computação e comunicações – a noção de integração necessita ser aplicada no interior de cada domínio e entre domínios distintos. Dito de outro modo, a integração deve ser o mais abrangente possível. A solução ideal corresponde a uma sobreposição total dos vários domínios, situação em que, do ponto de vista dos utilizadores, não seria possível distinguir sistemas específicos isolados, nem funções particulares, independentes.

A noção de integração assume uma importância vital no contexto dos edifícios inteligentes. Isso deve-se ao importante conjunto de vantagens e potencialidades que permite oferecer, de que se destacam:

- um melhor aproveitamento dos recursos existentes e uma maior eficácia na sua utilização;
- novas funções, como valor acrescentado da interacção e cooperação entre sistemas/aplicações;
- reacções mais coordenadas e rápidas;
- a capacidade de correlacionar informação, de a processar e de optimizar decisões;
- o acesso aos vários sistemas através de um mesmo ponto, o que se traduz numa utilização mais simplificada, flexível e eficaz;
- aumentos de produtividade, facilitando a execução de tarefas complexas envolvendo diferentes sistemas;
- soluções com uma melhor relação funcionalidade/custo.

Embora as vantagens da integração sejam indiscutíveis, existem alguns aspectos menos positivos que importa focar:

- nalgumas situações poderá ocorrer sub-aproveitamento das características específicas de certos sistemas;
- poderão surgir problemas operacionais relacionados com a interacção entre sistemas, podendo não ser trivial identificar a sua origem e quais as medidas a tomar;
- poderão existir obstáculos legislativos à integração (por exemplo, existem países que obrigam a que os sistemas de detecção de incêndio sejam independentes e isolados).

3. SERVIÇOS PARA EDIFÍCIOS INTELIGENTES

3.1. O Conceito de Serviço

As capacidades dos sistemas presentes num edifício avaliam-se pelas funções que executam. Essas funções, que podem ser bastante diversificadas, possuem no entanto características (tais como a sua natureza, o seu âmbito, ou os seus objectivos) que as permitem agrupar em conjuntos. É nesta perspectiva que se introduz a noção de *Serviço*, a qual corresponde a um conjunto de funções que, pela sua natureza, pela sua íntima inter-relação e/ou dependência, pela sua partilha ou intervenção sobre informação comum, pela sua associação a um mesmo tipo de equipamento físico, justificam o seu agrupamento numa entidade individualizada.

De salientar que as funções desempenhadas por um serviço não necessitam de estar, forçosamente, associadas a dispositivos físicos (envolvendo interacções com sensores e actuadores). Um serviço pode ser constituído apenas por funções de natureza *software*. Deste modo, uma base de dados ou um determinado programa específico podem também ser considerados serviços. Ou seja, a noção de serviço é bastante genérica, podendo ser aplicada aos mais diversos domínios e não se restringindo apenas à área da automação e gestão de edifícios.

3.2. Exemplos de Serviços

Vamos em seguida apresentar um conjunto de serviços para edifícios inteligentes e descrever uma súmula das funções de alguns deles. Pretende-se deste modo abordar o edifício inteligente sob o ponto de vista funcional, oferecendo uma visão diversificada e abrangente que cobre múltiplas áreas de interesse e não apenas as tradicionalmente associadas à Gestão Técnica. Segue-se o conjunto de serviços para edifícios inteligentes, indicando-se entre parênteses uma designação abreviada de cada serviço:

- Apoio à Portaria (*Portaria*)
- Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (*AVAC*)
- Comunicações e Distribuição de Audio e Video (*Comunica. Audio-Video*)
- Controlo de Acessos (*Acessos*)
- Controlo de Estacionamento de Veículos (*Estacionam.*)
- Controlo de Irrigação (*Irrigação*)
- Detecção de Situações de Emergência (*Emergência*)
- Diagnóstico de Falhas e Manutenção de Sistema (*Diagnóstico e Manutenção*)
- Elevadores (*Elevadores*)
- Gestão de Cablagem (*Cablagem*)
- Gestão de Presenças (*Gestão de Presenças*)
- Gestão e Administração de Sistema (*Gestão e Administração*)
- Gestão Energética (*Gestão Energética*)
- Iluminação (*Iluminação*)
- Informação (*Informação*)
- Inventariação e Gestão Patrimonial (*Gestão Patrimonial*)
- Localização de Pessoas e Equipamentos (*Localização*)
- Manutenção do Edifício (*Manutenção*)
- Vigilância e Detecção de Intrusão (*Vigilância*)

Antes de iniciar a descrição de alguns serviços, convém salientar diversas capacidades que são comuns a todos eles:

- configuração e gestão do serviço, permitindo a sua adequação a cada caso de aplicação (deverá ser possível, por exemplo, definir que equipa-

mentos estão associados ao serviço e qual o seu tipo, definir quais as suas identificações, locais do edifício em que estão instalados, etc);

- monitorização e teste do estado de funcionamento de dispositivos mecânicos e respectivos equipamentos de controlo, com vista a detectar a ocorrência de falhas e a registar tempos de funcionamento (esta informação será de grande utilidade para a realização de acções de manutenção);
- gestão e controlo dos privilégios dos vários tipos de utilizadores;
- interacção com os utilizadores, possibilitando a realização de tarefas de configuração, parametrização e gestão do serviço, ou simples consulta de informação (de notar que determinadas tarefas estarão restringidas apenas aos utilizadores com os privilégios adequados);
- realização de registos de informação relevante e sua gestão (com vista a possibilitar, por exemplo, a sua análise estatística ou a sua transferência para outras aplicações).

Seguidamente, e apenas a título ilustrativo, apresenta-se uma descrição muito sucinta das funcionalidades associadas a cinco dos serviços indicados. Relativamente aos restantes serviços, espera-se que a sua designação seja suficiente para dar uma indicação do correspondente âmbito de intervenção. Para o leitor mais interessado nos aspectos funcionais sugere-se a leitura do apêndice 1 da referência [nune95]. Nele é apresentada uma descrição mais pormenorizada de cada serviço, com a identificação das funções e capacidades inovadoras que se destacam das funcionalidades habitualmente disponíveis nos sistemas de automação actuais.

- **Serviço de Apoio à Portaria**

  Este serviço tem por objectivo tornar mais eficaz e facilitar as tarefas a cargo das pessoas responsáveis pela(s) portaria(s) de um edifício.
  De entre as suas funções destacam-se o controlo e registo de entradas e saídas no edifício por parte de pessoas e de equipamentos, o fornecimento de informação de encaminhamento de visitas, o registo de mensagens de visitas para visitados e vice-versa, etc.

- **Serviço de Manutenção do Edifício**

  Este serviço tem a seu cargo a supervisão de todas as tarefas relacionadas com acções de manutenção (preventiva ou correctiva) associadas ao próprio edifício e às suas instalações técnicas.
  De entre as suas funções destacam-se as associadas à supervisão de pedidos de reparação e indicações de falhas, ao processamento desses pedidos (agrupamento por especialidades, atribuição de prioridades, estimativa de tempos de execução), à coordenação e escalonamento de acções de manutenção (incluindo a atribuição de tarefas às pessoas adequadas, contabilização da duração das operações executadas, registo das acções realizadas, contabilização de custos), ao controlo e gestão de contratos de manutenção, etc.

- **Serviço de Detecção de Situações de Emergência**

  Este serviço tem a seu cargo tarefas de detecção e combate de situações de emergência tais como incêndio, fugas de gases tóxicos e inundações.
  De entre as suas funções salientam-se as associadas ao encaminhamento de pessoas e à previsão da evolução e propagação de sinistros.

- **Serviço de Gestão de Presenças**

  Este serviço tem como principal missão registar os tempos de presença dos funcionários das várias organizações existentes no edifício e fornecer informação pormenorizada que permita, por exemplo, efectuar o processamento de vencimentos.

De entre as múltiplas funções que desempenha, destacam-se as relativas à aceitação de justificações de faltas ou ausências, à marcação de férias e ao processamento estatístico de informação e controlo de assiduidade.

- **Serviço de Informação**

  Este serviço conglomera em si múltiplas funções, que se caracterizam, na sua generalidade, por permitir o acesso a informação útil sobre o edifício e sobre as organizações que o ocupam, e oferecer facilidades de gestão de determinados recursos associados ao edifício.
  De entre as funções que desempenha referem-se o registo de reclamações e de sugestões, a recolha de solicitações diversas (por exemplo, pedidos de reparações, de instalação de equipamentos, de resolução de problemas), o armazenamento e o acesso a documentação diversa (manuais de equipamentos, procedimentos vários, estatutos, legislação, contratos de manutenção, etc), a gestão de recursos comuns do edifício (tais como salas de reunião, auditórios e áreas de lazer), etc.

3.3. Exemplos de Interacções entre Serviços

Uma análise cuidada das funções desempenhadas pelos diversos serviços permite concluir que a generalidade deles pode beneficiar significativamente da cooperação com outros serviços.

Na figura 1 estão ilustrados os vários serviços e as interacções mais representativas. Da análise da figura ressalta a existência de dois tipos de servi-

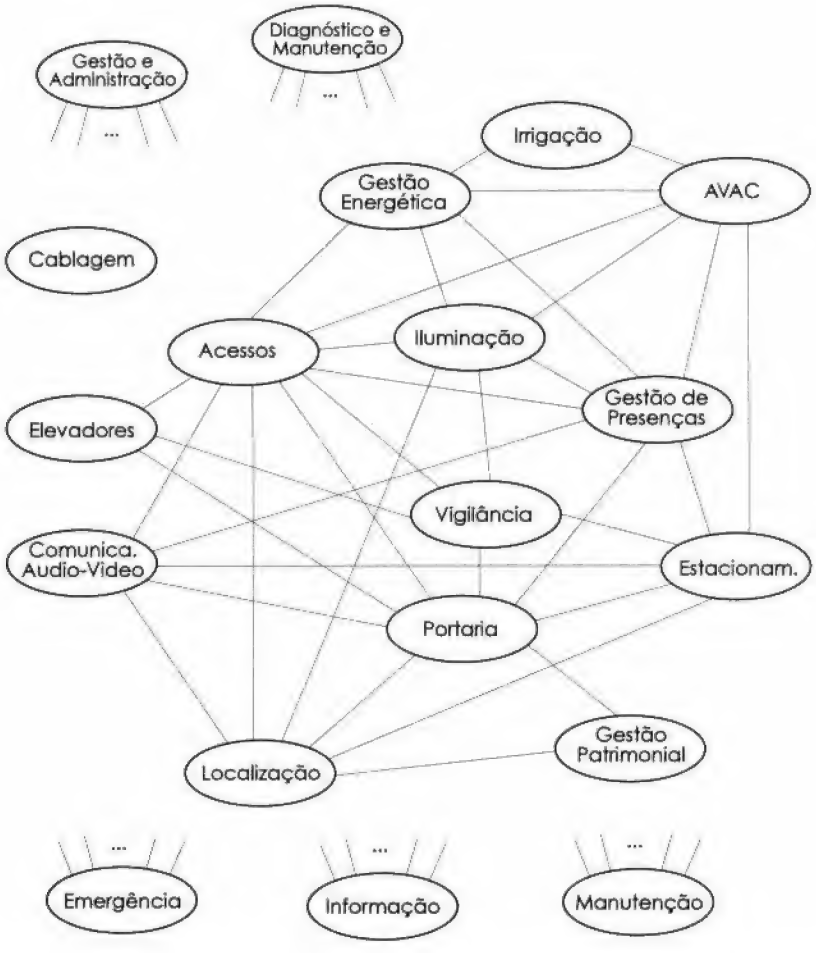


Fig. 1 Interacções entre serviços

ços: os que possuem um conjunto de interacções específicas (que ocupam a maior parte da figura e estão interligados através de uma complexa rede de ligações) e aqueles que interactuam com a generalidade dos restantes serviços (e que, para não complicar excessivamente a figura, foram representados apenas com um conjunto de ligações para o exterior).
Descrevem-se em seguida exemplos de interacções para os dois tipos de serviços identificados atrás. Essas interacções foram agrupadas em interacções genéricas e específicas.

3.3.1. Interacções Genéricas

O Serviço de Gestão e Administração de Sistema e o Serviço de Diagnóstico de Falhas e Manutenção de Sistema, pela sua própria natureza, interactuam com todos os restantes serviços.

O primeiro deles tem a seu cargo funções relacionadas com a supervisão e administração do sistema global. Para desempenhar da forma mais adequada as suas tarefas, é essencial que dialogue com os diversos serviços, obtendo informação sobre a sua configuração, o seu estado de funcionamento, grau de utilização, falhas ocorridas, etc. Com essa informação torna-se possível realizar uma gestão global do sistema muito mais correcta e eficaz (fundamentada em informação que está constantemente a ser actualizada), sendo facilitado todo o processo relativo à reconfiguração dos vários serviços e, consequentemente, do sistema global.

Relativamente ao Serviço de Diagnóstico de Falhas e Manutenção de Sistema é também essencial, para as funções que desempenha, que interactue com os restantes serviços. Assim, ele poderá conhecer detalhadamente o estado de funcionamento dos diversos componentes (dispositivos físicos ou aplicações software) que constituem cada serviço e poderá desencadear, com grande celeridade, as acções mais adequadas com vista à resolução das falhas ou dos problemas identificados.

Aborda-se em seguida o Serviço de Emergência, o qual interactua com a generalidade dos restantes serviços. Essa interacção visa, fundamentalmente, informá-los da ocorrência de sinistros e solicitar o desencadear de acções adequadas à situação. Relativamente a este aspecto, podem ser identificados dois grupos de serviços: os que desempenham papéis activos no combate ou prevenção das situações de emergência e os que desempenham um papel menos interventivo.

No primeiro grupo encontram-se, por exemplo, os serviços de AVAC, Iluminação, Elevadores, Controlo de Acessos e Controlo de Estacionamento de Veículos. Estes serviços, ao serem informados da existência de um incêndio numa determinada zona do edifício, desencadearão acções tais como: despressurização e desenfumagem da zona sinistrada (AVAC), pressurização das zonas de evacuação (AVAC), iluminação adequada das zonas próximas do sinistro e zonas de evacuação (Iluminação), desactivação dos elevadores deslocando automaticamente as cabinas ocupadas para pisos seguros (Elevadores), impedir o acesso às pessoas comuns a zonas que possam estar em risco de serem afectadas pelo sinistro e permitir a livre saída dos locais sinistrados (Acessos), bloquear o acesso a zonas de estacionamento que possam estar em risco (Estacionam.).

Relativamente ao segundo grupo de serviços (com um papel menos interventivo), podem referir-se os serviços de Comunicação e Distribuição de Audio e Video, Informação, Gestão de Presenças, Localização e Inventariação e Gestão Patrimonial.

Estes serviços, em caso de sinistro, centram os seus esforços na divulgação de informação sobre o que se está a passar e sobre como as pessoas devem proceder (Comunica. Audio-Video e Informação), na indicação de

que pessoas se encontram no local do sinistro e na sua vizinhança (Gestão de Presenças e Localização) e no fornecimento de informação que auxilie a identificação de equipamentos ou materiais sensíveis na zona do sinistro e na sua proximidade (Gestão Patrimonial).

Abordando agora o Serviço de Informação, constata-se que este interactua com todos os serviços, com vista a recolher informação estatística de cada um deles. Essa informação, após processamento, permitirá a realização de análises sobre o sistema global que serão de grande utilidade. Por outro lado, será natural que diversos serviços recorram ao Serviço de Informação quer para aceder a informação que ele detém quer para aceder aos recursos que ele gere.

Relativamente ao Serviço de Manutenção do Edifício, ele interactua com a generalidade dos restantes serviços com vista a recolher informação sobre os tempos de funcionamento dos vários equipamentos que eles controlam. Deste modo, as acções de manutenção preventiva podem ser optimizadas. De salientar também interações com o Serviço de Apoio à Portaria e Serviço de Controlo de Acessos, que serão de grande utilidade sempre que estiverem programados trabalhos de manutenção a realizar por pessoas estranhas ao edifício.

3.3.2. Interacções Específicas

Seguidamente são apresentados exemplos relativos a interacções específicas entre diversos serviços. Dado o elevado número de interacções envolvidas, optou-se por descrever apenas algumas delas e, mesmo assim, de forma muito sucinta. Uma descrição mais detalhada das várias interacções pode ser obtida no apêndice 1 da referência [nune95].

As interacções são identificadas pelas designações abreviadas dos serviços envolvidos, aparecendo em primeiro lugar o serviço de menor ordem alfabética.

- **Acessos – Iluminação**

  O primeiro serviço informa o segundo sobre a presença de pessoas em determinadas áreas, possibilitando o desligar da iluminações em zonas que ficaram desocupadas e o ligar da iluminação em zonas que passaram a estar ocupadas.

- **Elevadores – Portaria**

  O segundo serviço solicita ao primeiro funções do tipo *Taxi* em situações de visitas importantes.

- **Estacionam – Gestão de Presenças**

  O segundo serviço informa o primeiro sobre que pessoas estão de férias, quais as ausentes por motivo de doença e as que já concluiram o seu dia de trabalho, permitindo-lhe efectuar uma melhor gestão dos espaços de estacionamento.

- **Gestão Patrimonial – Portaria**

  O segundo serviço informa o primeiro sobre entradas e saídas de equipamentos.
  O primeiro serviço fornece ao segundo descrições pormenorizadas sobre equipamentos de modo a permitir a sua identificação fácil e idónea.

- **Portaria – Localização**

  O primeiro serviço solicita ao segundo a localização de determinada pessoa para que possa entrar em contacto com ela.

A concluir, é feita uma referência ao Serviço de Gestão de Cablagem (*Cablagem*). Embora a figura 1 possa sugerir que ele não interactua com

TÉCNICA n.º 3 SET 96

outros serviços, tal não é verdade. No entanto, as suas interações ocorrem apenas com os serviços que possuem um número muito elevado de interacções, tais como: Gestão e Administração, Diagnóstico e Manutenção, Informação, etc.

3.3.3. Ilustração de Interacções Múltiplas entre Serviços

Seguidamente são apresentados dois cenários em que se ilustram, com situações concretas, a ocorrência de múltiplas interacções entre serviços. Os exemplos apresentados demonstram claramente os benefícios da integração.

Cenário 1

Uma determinada pessoa (a Visita) dirige-se ao responsável pela portaria do edifício (o Porteiro) e indica que pretende falar com um certo funcionário (o Visitado).

Recorrendo ao Serviço de Apoio à Portaria o Porteiro constata existirem três pessoas com o nome indicado pela Visita. Recorrendo a informação fornecida sobre os possíveis visitados (por exemplo, nomes adicionais, organização em que trabalha, título, cargo desempenhado), o Porteiro inquire a Visita e identifica univocamente o Visitado.

Em seguida, o Porteiro verifica que não existem mensagens do Visitado para a Visita e efectua uma chamada telefónica para a extensão indicada pelo serviço.

Após aguardar algum tempo sem haver resposta, o Porteiro deduz que o Visitado não se encontra no seu local de trabalho e desencadeia a sua localização. Para tal, é contactado automaticamente o Serviço de Localização o qual indicará onde o Visitado se encontra e qual a melhor forma de contactar com ele.

De notar que, se o Serviço de Localização fosse incapaz de localizar o Visitado, poderia ser contactado o Serviço de Gestão de Presenças que verificaria se o Visitado já havia concluído o seu dia de trabalho ou se ele se encontra de férias.

Seguidamente o Porteiro contacta o Visitado e confirma se este deseja receber a Visita. Em caso afirmativo, é solicitada a geração de um cartão de identificação para a Visita e é pedida (ao Serviço de Controlo de Acessos) as autorizações de acesso necessárias para que a Visita se possa dirigir ao local em que o Visitado se encontra (ou, em alternativa, a um local de encontro pré-definido).

Por último, e caso a Visita desconheça o edifício, o Porteiro pode desencadear o fornecimento de informação de encaminhamento que pode ser gráfica ou textual.

Cenário 2

O funcionário *F* necessita marcar uma reunião que irá envolver diversas pessoas da sua organização e pessoas de outras organizações (externas ao edifício).

Para atingir esse objectivo, *F* recorre ao Serviço de Informação e selecciona uma sala de reuniões adequada para o número de pessoas envolvidas. Efectua então a sua reserva para o dia e hora desejados.

De notar que, no caso de a sala já se encontrar reservada para a altura indicada, o Serviço de Informação pode sugerir alternativas e permitir a consulta de todas as reservas existentes em torno da data pretendida.

Efectuada a reserva, *F* indica quais as pessoas que irão estar presentes. A lista de todos os indivíduos externos ao edifício é automáticamente enviada para o Serviço de Apoio à Portaria, juntamente com uma mensagem indicando qual o local da reunião.

Adicionalmente, é também enviada automaticamente informação para os serviços de Controlo de Acessos e AVAC, para que no dia da reunião todas as pessoas envolvidas possam aceder à sala e para que esta esteja convenientemente climatizada.

No dia da reunião, e algum tempo antes da hora marcada, *F* solicita ao Serviço de Comunicações e Distribuição de Audio e Video que efectue o encaminhamento de todas as chamadas telefónicas a ele destinadas, para o local em que ele se encontrar. Assim, *F* poderá ultimar os preparativos para a reunião, deslocando-se livremente pelo edifício, sem ficar incomunicável. À medida que *F* se for deslocando pelo edifício a sua posição irá sendo identificada (pelo Serviço de Localização e, eventualmente, também pelo Serviço de Controlo de Acessos) e fornecida ao Serviço de Comunicações e Distribuição de Audio e Video, o qual interactuará com o PPCA de modo a efectuar o encaminhamento automático de chamadas para a extensão mais próxima do local em que *F* se encontra.

Algum tempo antes do início da reunião o Serviço de AVAC inicia a climatização da sala, ajustando os fluxos de ventilação ao número de pessoas que irão estar presentes.

A primeira pessoa que aceder à sala de reuniões desencadeará o ligar automático da iluminação (acção realizada pelo Serviço de Iluminação no seguimento de informação fornecida pelo Serviço de Controlo de Acessos).

4. CONCLUSÕES

Neste artigo foi realçada, de forma sucinta, a importância que os edifícios inteligentes possuem e o forte impacto económico que lhes está associado. A abordagem efectuada procurou dar uma visão funcional de um edifício inteligente, traduzindo um conjunto diversificado de conceitos que se manifestam ao nível dos serviços, das funções que eles desempenham e das suas interacções. Foi dada ênfase especial aos aspectos da integração como requisito imprescindível de um edifício inteligente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[amil92] Alan Miller: "Energy Efficiency", Future/Build 2002 Conference, October 1992.

[bake93] Nelson Bakewell: "Extracting Real Value from Your Property", AFM newsletter, No. 41, p. 12, April 1993.

[ibif87] Intelligent Buildings Institute: "Intelligent Building Definition", Intelligent Buildings Institute, Washington, 1987.

[nune95] Renato Nunes: "Integração de Serviços para Edifícios Inteligentes", Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico, Julho 1995.

[rgei90] Richard Geissler: "Open Protocols – The Missing Link", Facilities Management International Conference, Glasgow, April 1990.

TÉCNICA
Revista de Engenharia
Publicação trimestral
de investigação científica e desenvolvimento

UMA REVISTA DE ENGENHARIA

A Técnica, Revista de Engenharia, tal como a Associação dos Estudos do Instituto Superior Técnico, onde se integra, acompanha, desde os primeiros tempos, a vida do Instituto.

Das suas páginas constam artigos científicos e técnicos de flagrante actualidade quantas vezes pioneiros, entre nós, de ciência nova e de novas tecnologias.

A revista tem uma periodicidade de quatro números por ano e está estruturada em perfeita adequação à intensa actividade de investigação e desenvolvimento que hoje se processa no campus de Instituto Superior Técnico.

Compreende, assim artigos convidados, comunicações científicas originais e notícias sucintas e rigorosas sobre ciência, tecnologia e desenvolvimento.

Trata-se, pois, de uma revista científica de nível o que não impede a colaboração de estudantes desde que devidamente credenciados por investigadores qualificados e de reconhecido mérito.

Torne-se assinante da Técnica.

Para mais informações contacte-nos pelo telefone 351-1-848 10 18 / 841 73 62 ou fax 351-1-847 40 14 / 849 92 42
ou escreva-nos para: Técnica, Revista de Engenharia, Av. Rovisco Pais n.° 1, P-1098–Lisboa CODEX
Publicidade: DOSSIER – Comunicação e Imagem, Lda., R. Eça de Queirós, 18 - 2.° 1000 Lisboa
Telefs. (01) 355 92 94/5 - 353 73 21 – Fax/Telef. (01) 353 73 12

SISTEMAS CATALÍTICOS V_2O_5/TiO_2

Cristina R. Dias, M. Farinha Portela

Original Submetido em: 15 de Dezembro de 1995

RESUMO

No presente artigo são analisados aspectos importantes dos sistemas catalíticos de V_2O_5 suportado sobre TiO_2 (V_2Os/TiO_2). Assim, são descritas as suas principais aplicações, com especial destaque para a reacção de oxidação de *o*-xileno a anidrido ftálico, os suportes catalíticos mais utilizados e sua influência nas características do catalisador e nos processo catalíticos. São igualmente analisadas as espécies de vanádio formadas à superfície do catalisador, seu estado de oxidação e o modo como as propriedades redox e ácido-base podem influenciar os produtos reaccionais obtidos. Finalmente, é referida a utilização de promotores e analisado o seu efeito na reacção catalítica

ABSTRACT

Important features of catalysts of V_2O_5 supported on TiO_2 (V_2O_5/TiO_2) are analysed Their main aplications are described particular emphasis being given to the oxidation of *o*-xylene to phthalic anhydride. The main catalytic supports and their influence on the characteristics of the catalysts are mentioned. The features of the compounds of vanadium formed over the catalytic surface and how their redox and acidic properties influence the catalytic process are analysed. Finally, the use of promoters and their influence on the catalyst performance are discussed.

1. INTRODUÇÃO

Actualmente os sistemas catalíticos de V_2O_5 suportado em TiO_2 (V_2O_5/TiO_2) apresentam grande importância em Indústria Química. De facto, estes compostos são utilizados como catalisadores em numerosos processos industriais, nomeadamente reacções de oxidação selectiva de hidrocarbonetos, redução de NO_x por amónia, amoxidação de aromáticos e oxidação de SO_2[1-5].

Entre as reacções de oxidação de aromáticos convém referir, como de particular importância, a oxidação de *o*-xileno a anidrido ftálico, dada a larga aplicação deste produto em Indústria Química, nomeadamente na obtenção de ftalatos (usados como plastificantes para PVC[6]) Os primeiros catalisadores usados para a reacção de oxidação de *o*-xileno baseavam-se em óxidos de vanádio puros que, apesar de apresentarem elevada selectividade, eram eficientes apenas para baixos caudais de matéria prima [7]. Em 1968, a BASF começou a recorrer a catalisadores baseados numa camada de V_2O_5 suportada em TiO_2, a qual era posteriormente depositada numa particula esférica de material inerte l6l. Desde então os sistemas de V_2O_5 suportado em TiO_2 têm vindo a adquirir uma importância crescente. Para estes catalisadores, o teor em elemento activo, o qual está directamente ligado ao número de monocamadas de óxido de vanádio formadas sobre o suporte, parece influenciar significativamente o comportamento catalítico, indicando, diversos estudos publicados [8-10], que a utilização de uma só monocamada de V_2O_5 permite a obtenção de melhores rendimentos em anidrido ftálico Actualmente, os catalisadores industriais são preparados depositando uma fina camada do sistema V_2O_5/TiO_2-anatase num material inerte e não poroso (aneis ou esferas), sendo o ligante utilizado formamida, dimetilformamida ou ácido acrílico l6l. A aplicação de um filme muito fino de V_2O_5/TiO_2 está ligada ao facto de a reacção ser extremamente exotérmica, absorvendo o suporte parte do calor desenvolvido.

Dada a importância actual dos sistemas catalíticos V_2O_5/TiO_2, pretende-se, com o presente artigo, rever as teorias mais recentes sobre a sua estrutura e influência das suas propriedades nos processos catalíticos (em particular, para a reacção de oxidação de *o*-xileno a anidrido ftálico), assim como a análise do efeito da utilização de diferentes suportes e promotores.

2. SUPORTES CATALÍTICOS

Os catalisadores suportados têm vindo a adquirir ultimamente uma importância crescente De facto, a utilização de suportes permite a obtenção de maiores áreas específicas e favorece a estabilidade mecânica e térmica do catalisador aumentando o seu tempo de vida [11,12] São referidos na literatura diversos suportes dos quais os mais utilizados são sílica, titânia e alumina [13-15].

Durante muito tempo os suportes foram considerados inertes nas reacções catalíticas. Sabe-se hoje,

no entanto, que a sua estrutura e composição pode influenciar fortemente o comportamento catalítico [16-18]. Actualmente, para a reacção de oxidação de *o*-xileno, os catalisadores mais utilizados são suportados em TiO_2, na fase cristalográfica anatase, a qual é estável a baixas temperaturas (T<973 K)[19,20].

De facto, a utilização daquele suporte permite a obtenção de conversões mais elevadas e melhores rendimentos em anidrido ftálico [21-25]. De igual modo, a desactivação dos catalisadores suportados em TiO_2-anatase e bastante menor quando comparada, por exemplo, com catalisadores suportados em silica [7]. A explicação para o comportamento daquele suporte não esta perfeitamente estabelecida. Vejux e Courtine [26] atribuem o papel do suporte ao acordo geométrico entre os planos (010) e (001) da anatase com o plano (010) de V_2O_5. A exposição da face (010), deste último composto faz com que o número de grupos V=O orientados perpendicularmente seja maior, o que aumenta a actividade destes catalisadores. De facto, a face (O10) de V_2O_5 é mais activa e selectiva para a oxidação de *o*-xileno a anidrido ftálico, aumentando estas grandezas proporcionalmente à fracção de plano (010) exposta [27,2]. A explicação está no facto de os grupos vanadilo, correspondentes ao plano (010), constituirem os centros activos para a reacção em estudo [27]. Esta explicação não é, no entanto, unanimemente aceite. Segundo Wainwright e Foster [7], a importância da rede de TiO_2 no fornecimento de oxigénio para reacções de oxidação de hidrocarbonctos pode ser explicada tendo em conta que:

- o oxigénio necessário à reacção de oxidação é fornecido pelo suporte
- a velocidade de difusão de oxigénio através da rede catalítica (e portanto a velocidade de reoxidação do catalisador) depende directamente da estrutura do suporte utilizado
- o fornecimento de oxigénio à superfície catalítica influencia a velocidade de reacção e a selectividade

Para outros investigadores, o comportamento dos diversos suportes está relacionado com o diferente estado de oxidação apresentado pelo vanádio nas espécies de superfície formadas. Assim, Gasior e colaboradores [29] demonstraram que V_2O_5 depositado em anatase apresenta melhor selectividade e actividade para a oxidação de *o*-xileno já que utilizando aquele suporte, e para condições de estado estacionário, o catalisador se apresenta menos reduzido.

O fenómeno de dispersão de V_2O_5 pela anatase tem sido referido frequentemente [30,31]. A deposição de V_2O_5 sobre titânia na forma anatase promove a dispersão de um óxido sobre o outro, o que não acontece para outros suportes ou outras variedades estruturais do dióxido de titanio [32], em que se verifica formação de grãos de V_2O_5 sobre a superfície. Segundo Dyakova e colaboradores [33], a presença de anatase além de provocar uma maior dispersão da fase activa (vanádia) é igualmente responsável pela alteração das suas propriedades redox.

3. ESPÉCIES DE VANÁDIO DE SUPERFÍCIE

As espécies de vanádio em catalisadores suportados foram caracterizadas recorrendo a diversas técnicas (espectroscopia Raman, FTIR, EXAF, XANES, etc.). No entanto, apesar dos numerosos estudos efectuados, existe ainda grande controvérsia acerca da sua estrutura, a qual parece ser bastante influenciada pelo teor em elemento activo e grau de hidratação da superfície. Assim, para teores em V_2O_5 inferiores aos correspondentes a uma monocamada, foi detectada a presença de espécies isoladas de vanádio, apresentando uma estrutura tetraédrica (estrutura A – Fig. 1) [34,35]. Poste-

riormente, Bond e colaboradores [36] propuseram que as espécies de superfície formadas incluem grupos oxo-hidroxi ligados a centros constituídos por dois átomos de oxigénio (estruturas B e C). Por aquecimento em atmosfera seca, poderá haver desidratação com formação de espécies octaédricas [37] (estrutura D) ou espéeies de vanádio simples [38] (estrutura E).

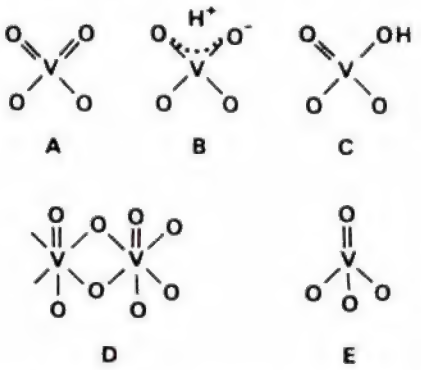


Fig. 1 Espécies de vanadio de superfície: estruturas propostas [34-38]

Para teores em pentóxido de vanádio superiores a 4% há formação de V_2O_5 paracristalino o qual apresenta, no entanto, propriedades diferentes de V_2O_5 cristalino livre. A utilização de espectroscopia de raios X [39,40] mostra que, para teores elevados em V_2O_5, não se obtém camadas sucessivas sobre a superfície catalítica. Assim, foi proposto que a formação de V_2O_5 paracristalino se desenvolveria sob a forma de "torres" ou estruturas aciculares, perpendiculares ao plano constituído pela monocamada inicial (Fig. 2), sendo tais estruturas visíveis por microscopia electrónica [41].

Fig. 2 Representação esquemática da estrutura de catalisadores V_2O_5/TiO_2: a – monocamada de espécies VO_x, b – estrutura de V_2O_5 desordenada, c – V_2O_5 paracristalino [41].

Estudos recentes publicados por Herrmann e Disdier [42] não apoiam, no entanto, o modelo da monocamada até agora vulgarmente aceite. Estes autores, recorrendo a estudos de condutividade eléctrica, sugerem que, para catalisadores preparados pelo método de impregnação sem interacção, apresentando teores em V_2O_5 iguais ou superiores aos correspondentes a uma monocamada, parte do vanádio se encontra disperso na estrutura de TiO_2 estando o restante sob a forma de pequenas cristalites à superfície do suporte (Fig. 3). O vanádio dissolvido na estrutura de TiO_2 estaria sob a forma de iões V^V, aumentando o número e a dimensão das cristalites com o teor em V_2O_5.

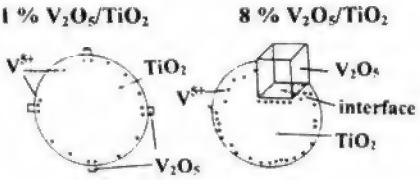


Fig. 3 Representação esquemática da estrutura de catalisadores V_2O_5/TiO_2 [42].

4. PROPRIEDADES REDOX

O estado de oxidação apresentado pelo elemento activo afecta fortemente o comportamento catalítico. Estudos publicados para a reacção de oxidação de *o*-xileno sobre sistemas V_2O_5/TiO_2 [42,43] referem a existência de vanádio em diversos estados de oxidação, nomeadamente foi detectada a presença de V_2O_5, V_6O_{13}, V_4O_9 e V_3O_7. É ainda referida a formação de V_2O_3 e VO_2, espécies estas que formariam continuamente soluções sólidas com TiO_2 [44].

Os estados de oxidação mais elevados são mais activos e selectivos [45]. Centi e colaboradores [46] referem quc a espécie V^{IV} diminui a selectividade em anidrido ftálico, no entanto, a presença de vanádio naquele estado de oxidação parece apresentar um papel importante na

activação da molécula reagente de *o*-xileno. O vanádio no estado de oxidação +5 seria, por sua vez, importante na inclusão de oxigénio na espécie adsorvida. Opinião semelhante é partilhada por Wainwright e Foster [7] segundo os quais, para a oxidação de *o*-xileno sobre V_2O_5/TiO_2, observa-se a presença de V^V e V^{IV}, sendo a razão entre os teores correspondentes a estas duas espécies importante para o comportamento catalítico.

O estado de oxidação parece ser influenciado pelo teor em fase activa apresentado pelos catalisadores. Para amostras contendo uma monocamada, esta seria constituída por uma camada heterogénea de espécies V^{IV}, fracamente ligada à superfície da titânia, e pequenos aglomerados de vanádio num estado de oxidação mais elevado [47]. À medida que se eleva o número de camadas de elemento activo aumentam os aglomerados de vanádio em estado de oxidação mais elevado, isto é, o estado de valência aumenta com o teor em V_2O_5 [47].

5. PROPRIEDADES ÁCIDO-BASE

As propriedades ácido-base da superfície de amostras V_2O_5/TiO_2 têm grande influência no comportamento catalítico, podendo ser estudadas recorrendo à adsorção de diferentes moléculas sobre a superfície catalítica.

Para o V_2O_5 cristalino, foi detectada a presença de centros ácidos Brönsted [48], ao contrário do que acontece com o TiO_2, o qual, na forma cristalográfica anatase, não apresenta acidez Brönsted [49]. Por outro lado, a adsorção de diversas moléculas sobre V_2O_5/TiO_2 [48], comprova a presença de centros ácidos Lewis e Brönsted, sendo estes últimos mais fortes do que para os correspondentes a V_2O_5 cristalino. A hidratação de centros ácidos Lewis em centros Brönsted foi observada experimentalmente [36].

As propriedades ácido-base da superfície, em particular, o bloqueio selectivo de centros ácidos, tem sido aproveitadas para a obtenção de melhores rendimentos em anidrido ftálico de facto, estudos publicados [50,51] referem que a adsorção de determinadas moléculas nomeadamente bases contendo azoto (NH_3, ureia, piridina) ou C_2H_4 sobre centros ácidos da superfície, provocariam um aumento do rendimento em anidrido ftálico.

6. EFEITO DE PROMOTORES

Geralmente os catalisadores utilizados incluem pequenas quantidades de elementos que favorecem o comportamento catalítico (promotores). Em particular, para a reacção de oxidação de *o*-xileno a anidrido ftálico, os promotores foram inicialmente utilizados na Alemanha, nos anos 30 [7], sendo actualmente utilizados para esse efeito elementos como Nb, Sb, P, K, Na, Cs, Rb, Mo, Ga, Ge, In, Tl, Sb, Se, Te, e Bi [6,7,52-55].

Andreikov [56] propôs que o efeito dos promotores está relacionado com a alteração das propriedades ácido-base da superfície catalítica, tendo esta teoria sido utilizada na análise do comportamento de uma série de catalisadores V-Ti-O contendo outros óxidos [57,58].

Ultimamente tem sido referido o papel promotor importante do enxofre [7,59], o qual favorece a formação de ligas com o óxido de vanádio com consequente aumento da dispersão dos centros activos na superfície catalítica. Por outro lado, estudos publicados [60,61] relacionam a desactivação do catalisador, vulgarmente observada após algum tempo de operação, à diminuição de teor em enxofre. Assim, a adição de enxofre, sob a forma de um óxido, à corrente de alimentação permite manter a actividade do catalisador elevada, dependendo o teor em enxofre a adicionar de vários factores expe-

rimentais [7]. De facto, a presença de SO_3 pode favorecer a reoxidação do catalisador, de acordo com a reacção [7]:

$$SO_3 + V_2O_4 \longrightarrow V_2O_5 + SO_2$$

7. BIBLIOGRAFIA

[1] G.Centi, I.Manenti, A.Riva, F.Trifirò, Appl.Catal., **9**, 177 (1984).

[2] R. A. Rajadhyaksha, G. Hausinger, H. Zeilinger, A. Ramstetter, H. Schmelz, Appl. Catal., **51**, 67(1989).

[3] J.A.Odriozola, H.Heinemann, G.A.Somorjai, J. F.Garcia de la Banda, P. Pereira, J.Catal., **119**, 71(1989).

[4] F.Cavani, G.Centi, F.Paranello, F.Trifirò, em "Preparation of Catalysts IV", (Ed. B.Delmon, P. Grange, P.A.Jacobs, G.Poncelet), Elsevier, Amsterdam (1987).

[5] S.V.Kozyrev, B.S.Balzhinimaev, G.K.Boreskov, A.A.Ivanov, V.M.Mastikhin, React. Kinet. Catal. Lett., **20**, 53(1982).

[6] V.Nikolov, D.Klissurski, A.Anastasov Catal.Rev. – Sci. Eng., **33**, 319(1991).

[7] M. S. Wainwright, N.R. Foster, Catal.Rev. – Sci.Eng., **19**, 211 (1979).

[8] G.C. Bond, K.Bruckman, Faraday Disc. Chem. Soc., **72**, 235 (1981).

[9] A J.van Hcngstum, J.G.van Ommen, H.Bosch. P. J. Gellings. Appl.Catal., **8**, 369(1983)

[10] I.E.Wachs, R.Y.Salch. S.S.Chan, C.C.Cherisch, Appl.Catal., **15**, 339(1985).

[11] P.L.Villa. em "Catalyst Deactivation", p.103 (Ed. B.Delmon. G.F.Fromet) Elsevier, Amsterdam(1980).

[12] G.C.Bond, S.Flarnerz Tahir, Appl. Catal., **71**, 1(1991).

[13] B.Jonson, B.Rebenstorf, R.Larsson, S.L.T.Andersson, J.Chem. Soc. Faraday Trans. **1**, 84(10). 3547(1988).

[14] M.Del Arco, M.J.Holgado, C.Martin, V.Rives, Langmuir, **6**, 801(1990).

[15] B.Jonson, B.Rebenstorf, R.Larsson, S.L.T.Andersson, S.T.Lundin, J.Chem.Soc. Faraday Trans. **1**, 82, 767(1986).

[16] M.Akimoto, E.Echigoya. J.Catal., **29**, 191(1973).

[17] D. Vanhove, M.Blanchard, J.Catal., **37**, 6(1976).

[18] M.S.Wainwright, T.W.Hoffman, Can.J.Chem.Eng., 55, 552 (1977).

[19] S.Matsuda, A.Kato, Appl. Catal., **8**, 149(1983).

[20] R.H.Perry, D.Green, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 6th Ed., Int.Student Ed.(1984).

[21] Y.Kera, T.Inone, Y.Matsukaze, Bull.Chem.Soc.Jpn., **61**(3), 761 (1988).

[22] B.Grzybowska, Catal. Today, **1**(3), 341(1987).

[23] C.Martin, V.Rises, Adsorp. Sci. Technol., 2, 241 (1985).

[24] M.Inomata, A.Miyamoto, T.Ui. K.Kobayashi, Y.Murakami, Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev., **21**, 424(1982).

[25] K.Mori, A.Miyamoto, Y.Murakami, J.Phys.Chem., **88**, 2741(1984)

[26] A.Vejux, P.Courtine, J.Solid State Chem., 23, 93(1978).

[27] M.Gasior, T.Machej, J.Catal., **83**, 472(1983).

[28] R.Haase, U.Illgen, J.Scheve, I. Schulz, React. Kinet.Catal., Lett., **28**(2), 395(1985).

[29] M.Gasior, I.Gasior, B.Grzybowska, Appl.Catal., **10**, 87 (1984).

[30] G.Hausinger, H.Schmclz, H.Knozinger, Appl. Catal., **39**, 267(1988).

[31] J. Haber, T. Machej, T. Czeppe. Surf. Sci., **151**, 301 (1985).

[32] M. Gasior. J.Haber T.Machej, Appl. Catal., **33**, 1(1987).

[33] B. Dyakova, B. Mehandzhicv, B.Grzynbowska, I.Gasior. J. Haber, Appl. Catal., **3**, 255(1982).

[34] R.Kozlowski, R.F Pettifer, J.M.Thomas, J.Phys.Chem., **87**, 5176 (1983).

[35] H.Miyata, T.Mukai, T.Ono, Y.Kubokawa, J.Chem.Soc.Faraday Trans. 1, 84. 4137(1990).

[36] G.Bond, J.Zurita, S.Flamerz, P.Gellings, H.Bosch, J.Van Ommen, B.Kip, Appl. Catal., **22**, 361 (1986).

[37] T. Kataoka, J.A. Dumesic, J.Catal., **12**, 66(1988)

[38] W.Fluhr, M.Schraml-Marth, A. Wokaun, A.Baiker, Ber. Bunsenges, Phys.Chem., **8**, 852 (1989)

[39] M.Inomata, K.Mori, A.Miyamoto, T.Ui, Y.Murakami, J.Phys. Chem., **87**, 754(1983).

[40] R.B.Quincy, M.Houalla, D.M.Herculcs, J.Catal., **106**, 85 (1987).

[41] G.C.Bond, S.Flamerz, R.Shukri, Faraday Disc. Chem.Soc., **87**, 65(1989)

[42] J.Hcrrmann, M. Disdicr, Catal. Today, 20, 135(1994).

[43] G.Centi, D.Pinelli, F.Trifiró, Symp. on StructureActivity in Heterogeneous Catalysis, Boston, 1990.

[44] F.A.Ivanovskaya, Kh.D.Sembaev, Zh.Fiz.Khim., 61(2), 494(1987).

[45] M.S.Wainwright, T.W.Hoffman, Can.J.Chem.Eng., **55**, 557 (1977).

[46] G.Centi, J.Catal., 130, 220(1990).

[47] J.Nickl, R.Schlogl, A.Baiker, H.Knozinger, G.Ertl, Catal. Lett., **3**, 379(1989).

[48] H.Miyata, K.Fujii, T.Ono, J. Chem. Soc. Faraday Trans.I, **84**, 3121 (1988).

[49] G. Busca, H.Saussey, O.Saur, J.C.Lavalley, V.Lorenzelli, Appl. Catal., **14**, 245(1985).

[50] D.Kh.Sembaev, F.A.Ivanovskaya. B.V.Suvorov. Izv.Akad. Nauk. Kaz. SSR, Scr. Khim., **4**, 52(1980).

[51] B.V.Suvorov, D.Kh, Sembaev, F.A.Ivanovskaya, Zh. Prikl. Khim. (Leninegrad), 49(7), 1648 (1976).

[52] O.E.Batalin, N.G.Glukhovskii. A. V. Aleksandr. G.F. Vorob'eva, L.Sh. Vorob'eva. Russ. Pat. 134786 (1986).

[53] M.Galantowicz, J.Waclawezyk, Z.Szysko, M.Bartyzel, J.Mynarek, S.Karpinski, J.Solinski, Pol. Pat.231480 (1981).

[54] A.G.Lyubarskii, V.M.Kornus, S.A.Eppel. S.A.Dam'e, D.F. Poezd. E. M. Vole, E.P.Prokhorov, N. E. Popov, M.N. Grabova, Russ. Pat 1169078 (1967).

[55] S. Slavov, V.Nikolov, K.Ivanov Geterog. Katal. S(1), 87(1983)

[56] E. I.Andreikov, Kinet, Katal., **17**, 1232 (1976).

[57] J.Zhu, S.Andersson, J. Chem. Soc. Faraday Trans. **1**, 85(11), 3629 (1989).

[58] B.Jonson, B. Rebenstorf, R.Larsson, S.Andersson, J.Chem. Soc. Faraday Trans. I, 84(19), 3547 (1988).

[59] G. H. Tandy, J. Appl. Chem., 68 (1956).

[60] H.Kakinoki, N.Sahara, I.Kanata, Y.Aigami, Shokubai Jap. Pat. **4**, 113(1962).

[61] W.Friedrichsen, O.Gochre, U.S.Pat. 3,565,829(1971).

SOBRE OS AUTORES

Cristina R. Dias é Engenheira Química e Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Química do Instituto Superior Técnico.

M. Farinha Portela e Engenheiro Químico e Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Química do Instituto Superior Técnico.

CONTROLO E PREVISÃO DE AVARIAS EM MOTORES DE AVIÃO

F. Alves
Laboratório Químico, Direcção-Geral de Manutenção e Engenharia,
TAP- Air Portugal

A. Estêvão Candeias
Departamento de Química da Universidade de Évora

P. Rosa Pereira
Departamento de Química e Bioquímica
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Original Submetido em: 26 de Janeiro de 1996

RESUMO

Os programas de controlo e previsão de avarias de motores de avião são processos interdisciplinares envolvendo várias áreas da engenharia. Nesta série de dois artigos pretende-se dar uma panorâmica daquilo que é o programa de controlo de motores da TAP-Air Portugal do ponto de vista químico. O primeiro destes artigos foca essencialmente a análise dos óleos lubrificantes dos motores por espectrofotometria de absorção atómica (SOAP) e o seu papel como indicador do grau de desgaste dos componentes do motor. O segundo artigo foca a análise de limalhas em suspensão nos óleos lubrificantes por espectrometria de fluorescência de raios X.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações de uma companhia de aviação é a segurança dos seus passageiros. Como consequência, as companhias de aviação têm desenvolvido programas de controlo e gestão de motores com o objectivo de, por um lado, dar a conhecer as suas condições operacionais e, por outro, detectar atempadamente possíveis avarias. Esta questão é tanto mais importante quanto a actual tendência dos grandes construtores mundiais de aviões de reduzir o número de motores por avião.

Por outro lado, existem factores económicos de importância capital que justificam a aplicação de tais programas. Problemas no sistema lubrificante do motor, se detectados tardiamente, acarretam custos enormes. Esta despesa deve-se não só ao aumento do número de horas/homem de trabalho requeridas para a sua reparação, mas também ao número de componentes que terão de ser substituídos.

Há ainda que considerar a remoção de um motor por avaria, fora da estação de manutenção da companhia, o que pode implicar a paragem do avião por algum tempo, o cancelamento e reescalonamento de certos vôos, o transporte de outro motor e de mão de obra especializada, resultando num processo extremamente oneroso.

Um programa deste género, recorre a vários tipos de controlo do sistema de lubrificação do motor que vão desde o registo de algumas variáveis do sistema lubrificante do motor durante o vôo, como a temperatura, pressão e consumo de óleo até à avaliação da condição dos componentes do sistema lubrificante do motor via análise das limalhas em suspensão no óleo. Este último processo compreende variadíssimas técnicas tais como a inspecção dos filtros de óleo e bujões magnéticos (MCD's) com posterior identificação das ligas metálicas ou a determinação espectrofotométrica do teor de certos metais presentes nesses óleos (SOAP).

Neste contexto, o SOAP ("Spectrometric Oil Analysis Program") apresenta-se como um dos métodos de controlo mais usados para monitorizar motores "on wing". O objectivo do SOAP é o de prever, atempadamente, possíveis

falhas que possam ocorrer no sistema lubrificante dos motores, a partir da variação do teor de certos metais no seio do óleo.

Contudo, o SOAP é um método controverso, havendo algumas companhias de aviação que o consideram uma ferramenta importante enquanto que outras acham que não tem qualquer utilidade. As opiniões sobre o SOAP podem ser sistematizadas em três grupos:

- Os que acreditam e confiam
- Os que acreditam mas não confiam
- Os que não acreditam

A TAP implementou o SOAP em 1992, e a sua experiência com este método levou-a a adoptar uma política coincidente com a do 2º grupo (acredita, mas não confia). Com o presente trabalho pretendemos mostrar a aplicação do SOAP a alguns exemplos concretos, bem como de algumas técnicas complementares que desenvolvemos com o intuito de fornecerem informação adicional aos centros de decisão.

A frota actual da TAP é composta por 36 aviões com uma idade média de 6,3 anos. Na tabela I apresentam-se os vários tipos de aviões, bem como os principais métodos de controlo dos seus motores.

FROTA	n.º de aviões	Tipo de motor	n.º de Motores	Métodos de controlo
L1011-500	5	RB211-524B4	20	MCD / X-RAY F
A310-300	5	CF6-80C2A2	13	MCD / X-RAY F
A320-200	6	CFM56-5A1	12	MCD / X-RAY F / SOAP
B737-300	8	CFM56-3B2	19	MCD / X-RAY F
B737-200	8	JT8D-17A	21	SOAP / ESP / PSIM
A340-300	4	CFM56-5C	17	MCD/X-RAY F

Tabela I: Métodos de controlo dos motores da frota da TAP.

Como se pode ver, a maior parte da frota dispõe de bujões magnéticos (MCD's) e a identificação das ligas das limalhas captadas por estes e pelos filtros de óleo é feita com um espectrómetro de fluorescência de raios X de energia dispersiva.

O único tipo de motor que não dispõe de bujões é o JT8D-17A, razão pela qual foi o eleito para se implementar, em 1992, o programa experimental de controlo baseado no SOAP e nas outras técnicas então desenvolvidas.

2. O PROGRAMA DE ANALISES ESPECTROMÉTRICAS DE ÓLEOS, SOAP

O objectivo primeiro do SOAP é a previsão atempada de possíveis falhas que possam ocorrer, devido a processos de desgaste, no sistema de óleo dos motores de avião.

O princípio do SOAP baseia-se no pressuposto de que existe uma relação directa entre a quantidade de metal produzida pelo processo de desgaste das peças lubrificadas e a sua concentração no óleo (1).

Determinando o teor de vários metais nos óleos em intervalos de tempo regulares, é possível obter uma curva tendencial da concentração em função do tempo que poderá ser representativa do comportamento e estado de

conservação do motor. Contudo, devido à sua própria natureza, o SOAP só pode ser aplicado em casos de desgaste progressivo, em que o processo evolui lenta e gradualmente permitindo um controlo tendencial do mesmo. Processos de desgaste rápido, como a produção de escamas ou a fadiga, não podem ser detectados pelo SOAP.

2.1. Amostragem

O SOAP requer uma metodologia de amostragem cuidada e consistente, de forma a permitir o controlo tendencial. O procedimento de amostragem na TAP consiste em retirar uma amostra de óleo do meio do depósito com uma bomba de sucção, 15 a 30 minutos após paragem dos motores e antes de se atestar o depósito.

A periodicidade de amostragem é de 200 horas de vôo (FH) por rotina e 100 para motores sob alerta.

2.2. Procedimento de Análise

Após um estudo de solventes realizado concluiu-se que o solvente apropriado para a análise do óleo Mobil Jet II, por absorção atómica, era o éter de petróleo de elevado ponto de ebulição (100-140°C). O procedimento de análise pode ser resumido da seguinte forma:

- Diluição 1:10 da amostra em éter de petróleo (100-140ºC)
- Metais analisados : Fe, Cr, Ni, Ag
- Análise realizada num espectrómetro de absorção atómica com chama de ar-acetileno e um queimador de três fendas.
- Padrões preparados com soluções organometálicas unielementares da CONOSTAN diluidas em óleo Mobil Jet II novo e éter de petróleo.
- Análise tendencial dos resultados.
- Limite de alerta : Fe > 5 ppm

3. ENGINE S.O.A.P. PREDICTION, ESP

Esta técnica foi desenvolvida pela MOBIL Australia (2) por forma a complementar os resultados do SOAP, e conjuga os resultados deste com a distribuição de tamanhos das partículas metálicas no óleo, permitindo assim uma previsão mais rigorosa de possível falha mecânica dos componentes lubrificados do motor.

O princípio deste método baseia-se no pressuposto de que, as partículas metálicas provenientes de um processo de desgaste aumentam de tamanho à medida que o desgaste se torna mais severo.

O ESP é um desenvolvimento do SOAP e a sua grande vantagem é que indica se um componente vai falhar, enquanto que o SOAP apenas indica se o componente se está a desgastar.

A importância do ESP prende-se também com o facto de, em certas ocasiões, motores com resultados de SOAP elevados não apresentarem tendência de falha, ou vice-versa. Desta forma, o ESP não substitui o SOAP, mas complementa-o, permitindo arbitrar sobre os seus resultados, sempre que estes o justifiquem.

A técnica consiste em dividir uma amostra de óleo em 3 partes sendo duas delas submetidas a filtração em membranas Millipore de 0.3 e 1.2 m, após o

que serão todas analisadas por absorção atómica para se determinar o seu conteúdo em Fe, o metal mais comum nas ligas.

Por um simples cálculo aritmético, estes resultados são convertidos num diagrama de ESP, no qual o teor em Fe é representado como uma percentagem do teor total de Fe em 3 intervalos de tamanho de partículas:

Fe(%) < 0.3 m Fe(%) entre 0.3 e 1.2 m Fe (%) > 1.2 m

Estes três valores produzem um gráfico de barras (fig. 1) que pode ser convertido num gráfico de linhas unindo os três pontos, para melhor visualização.

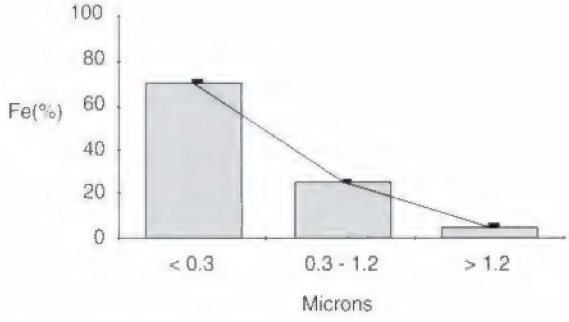


Fig. 1 Gráfico típico de ESP para um motor operacional

Consoante o formato da curva assim se pode tirar alguma conclusão sobre a evolução do processo de desgaste.

Como exemplo, apresenta-se na figura 2 uma progressão possível de um processo não destrutivo até falha eminente.

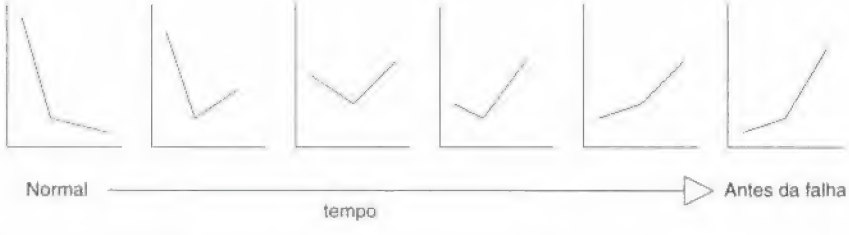


Fig. 2 Sequência de diagramas ESP correspondentes à passagem de um processo não destrutivo a um destrutivo.

4. MÉTODO INDEPENDENTE DO TAMANHO DA PARTICULAS, P.S.I.M.

Se considerarmos que os filtros de óleo dos motores do modelo JT8D são de 40 m e que o limite de atomização de uma chama de ar/acetileno é de 10/15 m, verifica-se que existe um intervalo de tamanho de partículas que não é detectado pelo SOAP. Saba e seus colaboradores desenvolveram um método (3,4,5,6,7,8,9) independente do tamanho das partículas, e o denominaram PSIM ("Particle Size Independent Method") ou por MADM ("Multielement Acid Dissolution Method"), o qual se baseia num ataque directo ao óleo por uma mistura de ácidos, seguida por diluição numa mistura apropriada de solventes.

O PSIM permite obter informação sobre o teor total de metais no óleo lubrificante usando absorção atómica de chama. Mesmo para outras técnicas

como o ICP ou EAS pode ser utilizado pois, o mecanismo de transporte da amostra (nebulizador, disco rotativo, etc.) pode não ser capaz de transportar partículas de maiores dimensões até ao ambiente de excitação (chama, plasma, arco eléctrico, etc.)

O procedimento de análise do PSIM pode ser resumido da seguinte forma:

- Amostra de óleo atacada com uma mistura ácida [HNO_3 + HCl (8:2)]
- Agitação ultrasónica durante 5 minutos
- Diluição 1:10 com mistura de solventes [Isopropanol /MIBK (9:1)]
- Agitação ultrasónica durante 5 minutos
- Análise da amostra por absorção atómica com chama de ar / acetileno
- Padrões e brancos feitos da mesma forma

5. ESP-PSIM

Este método é uma modificação do ESP no qual, a concentração total em Fe não é dada pelo SOAP mas sim pelo PSIM. Desenvolvemos este método pois verificámos que o ESP não estava a dar informação sobre a evolução do processo de desgaste, como se verá mais à frente quando se discutir alguns casos reais.

6. MOTORES EM ALERTA

No caso dos motores JT8D existem dois factos de vital importância para colocar um motor em estado de alerta: o filtro de óleo conter uma quantidade elevada de partículas metálicas e/ou o teor em ferro dado pelo SOAP ultrapassar os 5 ppm. Quando uma destas condições se verifica, tomam-se várias medidas de acordo com o diagrama da figura 3.

- Redução do intervalo de amostragem do SOAP e filtros
- Realizar análises de ESP e PSIM
- Representar gráficos de ESP e ESP/PSIM
- Análise por XRF de eventuais partículas metálicas encontradas no filtro

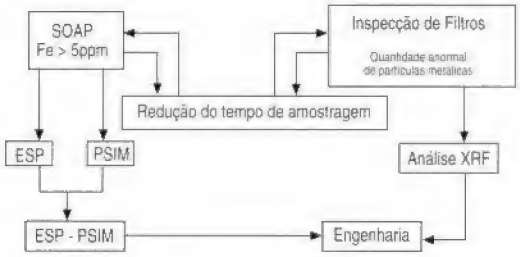


Fig. 3 Diagrama de motores em alerta

Toda a informação é então analisada pelos engenheiros responsáveis pelo motor, os quais decidem sobre a remoção ou não do motor após comparação com outras informações sobre o comportamento do motor como sejam vibrações, consumo de óleo, pressão, etc.

7. EXPERIENCIA DA TAP -DESCRIÇÃO DE CASOS REAIS

Desde que iniciámos este programa, em Maio de 1992, tivemos as três situações possíveis que se podem ter com o SOAP:

- Falha de motor em vôo sem alerta do SOAP (motor 8D929)
- Remoção injustificada (motor 8D284)
- Remoção justificada (motor 8D924)

Vejamos agora cada um destes casos em pormenor:

7.1. Motor 8D929: Falha do motor

A figura 4 apresenta as curvas de evolução do SOAP, as curvas do ESP e ESP/PSIM enquanto o motor esteve em alerta. Quando este motor falhou, o SOAP e todas as técnicas relacionadas estava ainda em fase de implemen-

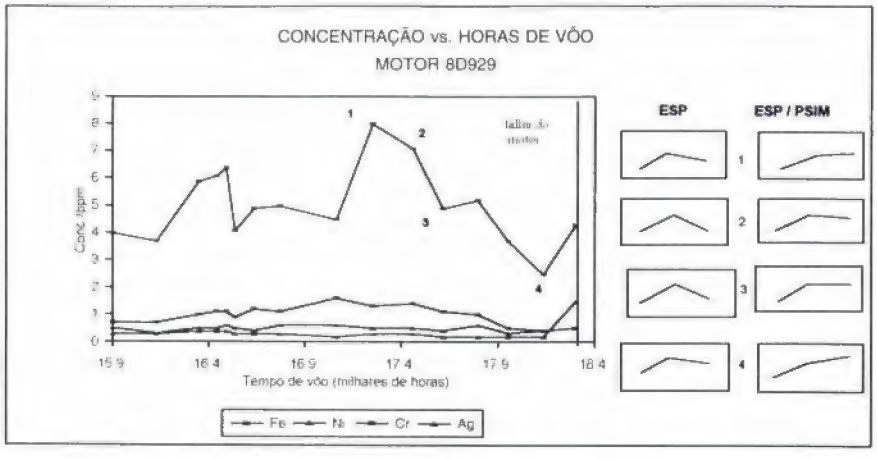


Fig. 4 Evolução do SOAP, ESP e ESP/PSIM do motor 8D929

tação. Os resultados do ESP e ESP/PSIM foram realizados à posteriori (após a falha do motor).

Como se verifica, os resultados do ESP/PSIM apresentam uma tendência para falha, enquanto que os do ESP não mostram qualquer evidência de desgaste.

Os resultados do SOAP por si só são inconclusivos uma vez que, a um aumento rápido do teor em Fe seguiu-se uma diminuição para os 2 ppm, bem abaixo do limite de alerta do SOAP. Este comportamento já foi igualmente relatado por outras companhias (1).

Após inspecção do motor, verificou-se que a secção do rolamento #3 ficou completamente destruída.

7.2. Motor 8D284: remoção injustificada

Este motor foi removido após um aumento constante do teor em Fe até 7 ppm e ocorrência de limalhas nos filtros de óleo.

A forma das curvas de ESP e ESP/PSIM indicavam possível falha (fig.5). Contudo, olhando em pormenor a evolução destas curvas com o tempo, verifica-se que, estas não se alteram o que poderia ser indicativo de um processo estacionário.

O aparecimento de limalhas no filtro de óleo precipitou a remoção do motor. Após inspecção, não se verificou qualquer evidência de desgaste destrutivo em qualquer componente lubrificado do motor.

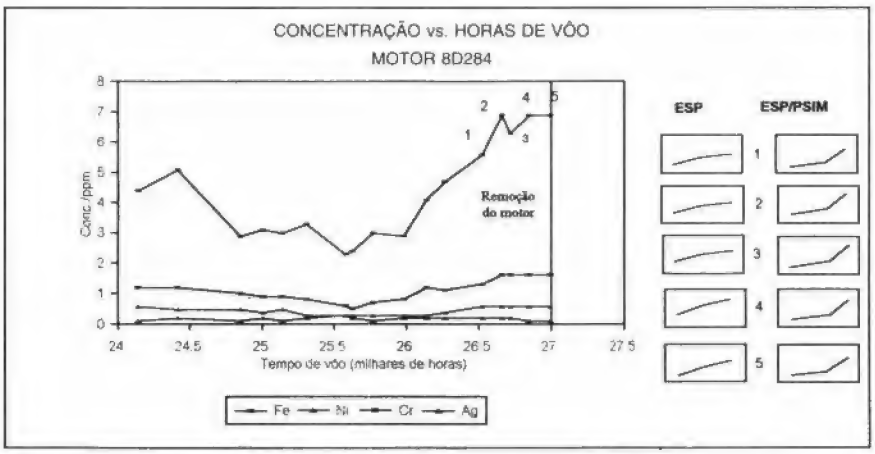


Fig. 5 Evolução do SOAP, ESP e ESP/PSIM do motor 8D284

Acreditamos que este motor foi removido muito cedo.

7.3. Motor 8D924: remoção justificada

A evolução do teor em Fe era semelhante à do primeiro caso, mas nesta altura já o programa estava totalmente implementado e operacional, o que permitiu prevenir uma possível falha do motor. Os resultados do ESP evidenciam tendência para falha, mas apenas no último ponto (fig. 6). Os resultados de ESP/PSIM não só indicam uma situação pior, como permitem um diagnóstico mais prematuro.

O estado de alerta imposto pelo SOAP a este motor, com o consequente aumento da frequência de inspecção do filtro, resultou no aparecimento de limalhas. Decidiu-se remover o motor baseados nos resultados e na experiência então acumulada.

Após inspecção do motor, verificou-se que algumas peças na região do rolamento #3 estavam danificadas, nomeadamente:

- pinhão cónico ("bevel gear")
- espaçador
- tampão de ar ("air seal")
- superfície interna da pista interior do rolamento

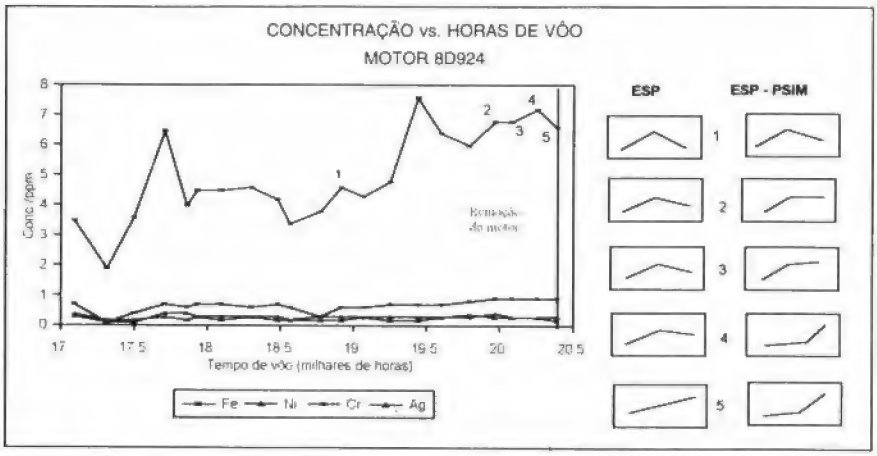


Fig. 6 Evolução do SOAP, ESP e ESP/PSIM do motor 8D924

O fenómeno de desgaste que ocorreu, bem conhecido dos operadores, foi a rotação da superfície interna da pista interior do rolamento no pinhão cónico.

9. BIBLIOGRAFIA

1 Air France, Proceedings of the *I Mobil Aviation Monitoring Symposium*, Miami, 1979.

2 J. A. Guymer, *E.S.P.-A technique for failure prediction*, Mobil oil Australia, 1975.

3 C. S. Saba, K. Eisentraut, *Anal. Chem.* **49** (1977) 354.

4 C. S. Saba, K. Eisentraut, *Anal. Chem.* **51** (1979) 1927.

5 J. Brown, C. S. Saba, W. Rhine, K. Eisentraut, *Anal. Chem.* **52** (1980) 2365.

6 C. S. Saba, W. Rhine, K. Eisentraut, *Anal. Chem.* **53** (1981) 1099.

7 R. E. Kauffman, C. S. Saba, W. Rhine, K. Eisentraut, *Anal. Chem.* **54** (1982) 975.

8 K. Eisentraut, R. Newman, C. S. Saba, R. Kauffman, W. Rhine, *Anal. Chem.* **56** (1984) 1087A.

9 C. S. Saba, K Eisentraut, *Appl. Spect.* **39** (1985) 689.

Palavras chave: biomonitorização, geoestatística, líquenes epifíticos, modelos estocásticos, salinidade troposférica, traçadores de sal.

SALINIDADE ATMOSFÉRICA: IMAGENS DE INTRUSÃO AO NÍVEL DO SOLO NUMA ZONA-PILOTO DO LITORAL ALENTEJANO

A.M.G. PACHECO[1,2], A.J. SOUSA[1], V. MARQUES[2], R. FIGUEIRA[1,3], F. CATARINO[3], C. BRANQUINHO[3]

[1] CVRM e [2] DEQ, Instituto Superior Técnico

[3] Museu, Laboratório e Jardim Botânico, Universidade de Lisboa

Original Submetido em: 2 de Fevereiro de 1996

RESUMO

Os primeiros mapas de intrusão salina atmosférica obtidos através de monitores biológicos (líquenes epifíticos) e modelização geoestatística (krigagem com deriva externa) são aqui apresentados e discutidos. A metodologia empregue poderá vir a constituir a base de um sistema integrado de avaliação e previsão do risco salino em áreas continentais, evitando assim o recurso a onerosos sistemas de rastreio e a modelos de dispersão de cariz determinístico, com fraco desempenho ambiental.

INTRODUÇÃO

A importância da salinidade atmosférica enquanto vector de risco natural e as consequências da deposição de sal marinho na litosfera foram recentemente revistas por Pacheco *et al.* [1], na perspectiva do respectivo impacto sobre os materiais de Engenharia e sobre a generalidade das infra-estruturas produtivas. Assim, a prevenção ou, pelo menos, a consideração do risco salino deve informar qualquer estratégia de gestão e ordenamento do território, a menos que se esteja disposto a pagar um preço elevado em termos de recursos naturais e/ou equipamentos humanos [2-4]. Um sistema de avaliação da salinidade atmosférica que integre a flexibilidade da monitorização biológica com a robustez da modelização estocástica permitirá não só diminuir os custos logísticos (encargos de instalação, manutenção e operação das redes) e as limitações da amostragem (malha fixa, insuficiência de dados), mas também aumentar a fiabilidade dos modelos de dispersão salina face às abordagens empíricas e/ou exclusivamente determinísticas: estas, aliás, parecem algo desajustadas perante a extrema variabilidade inerente aos fluxos salinos [5-13], e sensíveis ao ruído amostral e à escassez dos resultados de campo [14,15].

Os líquenes e briófitos são organismos de uma grande simplicidade e têm vindo a ser frequentemente utilizados como monitores de contaminação em habitats terrestres [16-27]. As primeiras observações sobre líquenes relacionadas com poluição atmosférica datam já de meados do século passado [28], embora a grande maioria dos estudos se situe na segunda metade deste século. Uma exaustiva revisão da literatura sobre estes organismos enquanto bioindicadores e bioacumuladores pode ser encontrada em Nimis [29], o qual sumariza ainda as características que fazem deles monitores biológicos potencialmente superiores às plantas vasculares, aos fungos não-liquenizados ou mesmo aos briófitos. Em geral, os líquenes epifíticos são tidos por mais adequados à biomonitorização do que os saxícolas e terrícolas, uma vez que o controle genético faz com que os substratos vegetais não apresentem o grau de variabilidade inerente às rochas e aos solos.

A resposta dos líquenes a gradientes salinos tem sido investigada e discutida praticamente apenas em termos de factores ecológicos/nutricionais

relevantes para a morfologia das espécies ou a respectiva zonagem [30-32], havendo poucas excepções de estudos sobre traçadores elementais de sal e sua eventual correlação com o aerossol marinho [33-35]. As primeiras indicações de que estes organismos poderão funcionar como biomonitores de salinidade atmosférica têm sido obtidas por Figueira *et al.* [36,37] mediante a calibração de *Ramalina calicaris* e *Usnea* spp. em função de deposímetros físicos. Os referidos estudos começaram por identificar as espécies mais promissoras entre os epífitos disponíveis e nelas dosear os elementos relevantes em termos de contaminação salina e potenciais indicadores desta, isto após o reconhecimento de características adequadas à biomonitorização.

A análise de processos ambientais envolve quase sempre o tratamento de dados não-determinísticos e que, como tal, devem ser observados como realidades estocásticas. A Geoestatística [38,39] – ramo da Estatística Espacial que na sua origem [40,41] tinha como objectivo a avaliação de reservas mineiras – dispõe hoje de metodologias próprias para caracterizar e tratar dados correlacionáveis no espaço e/ou no tempo. Em particular, sob o nome genérico de krigagem, têm sido desenvolvidos métodos de predição espacial assentes na minimização da média do quadrado dos erros (*minimum mean-squared error methods*), cujas variantes usuais dependem apenas dos momentos de 2.ª ordem do processo espacial: trata-se de uma generalização das técnicas de regressão numérica, em que a correlação espacial (modelizada previamente) é incorporada no algoritmo de minimização.

Neste trabalho, recorre-se à krigagem com deriva externa [42-47] para interpolação espacial dos teores em traçadores iónicos de sal marinho (Cl^-, Na^+) de indivíduos de *Ramalina* spp. colhidos na área de estudos de salinidade troposférica do litoral alentejano. A referida técnica permite integrar no processo de predição de uma variável (primária) informação acerca de outras ditas externas, e que podem ser exaustivamente conhecidas no domínio espacial. Os resultados foram empregues na estimação probabilística daqueles teores para a faixa costeira da área de estudo, e na construção de mapas que condensam esta informação e fornecem imagens da intrusão salina biomonitorizada ao nível do solo pelas referidas espécies.

METODOLOGIA

Material de estudo

O material de partida para este estudo foi proveniente da zona ilustrada na Figura 1; a posição exacta dada por satélite (*Global Positioning System* – GPS) dos 69 locais para amostragem de *Ramalina* spp. em cerca de 16 x 8 km (forófito: *Pinus pinaster*) pode ser vista na Figura 2, sobre um modelo digital do terreno em causa (base digital: Serviço Cartográfico do Exército; processamento geográfico: ARC/INFO®).

Durante a campanha de recolha, o material biológico foi sendo acondicionado em sacos de polietileno fechados e identificados segundo o local de colheita, tendo sido depois guardado em câmara fria até ao respectivo processamento laboratorial: este foi efectuado sem contacto directo com as mãos, com o auxílio de luvas e pinças de acordo com as circunstâncias.

Análise laboratorial e numérica

Para a determinação de catiões, foi modificada a sequência de eluição proposta por Brown & Wells [48]. A parede celular dos líquenes possui numerosos lugares com carga negativa, aos quais os catiões ficam eficientemente ligados [49]; contudo, essa eficiência depende da carga e do raio do catião

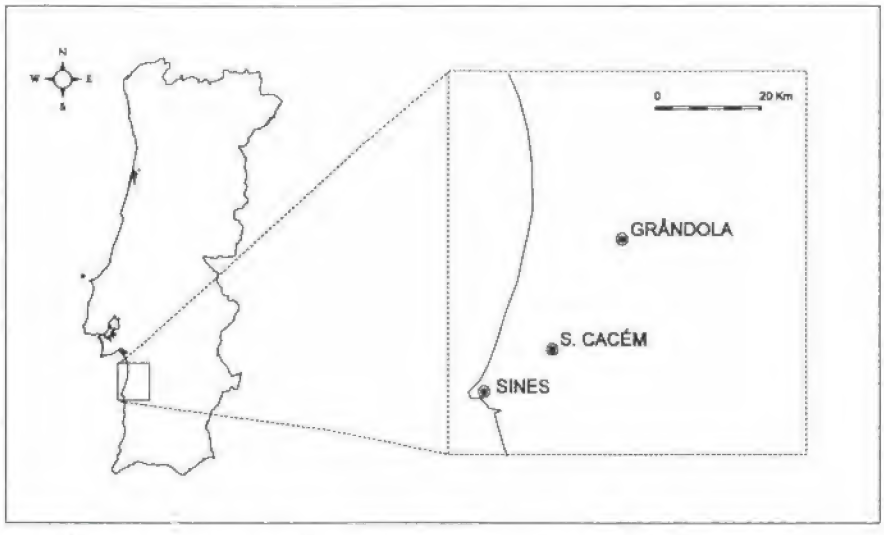


Fig. 1 Área de estudos de salinidade troposférica do litoral alentejano.

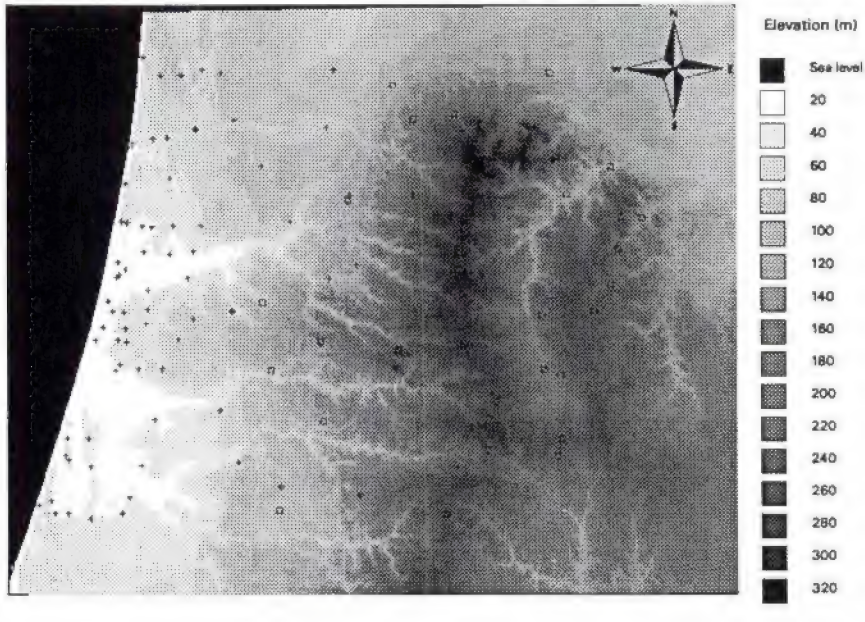


Fig. 2 Modelo digital do terreno (densidade: 1079 pontos cotados km^{-2}) e locais de amostragem de *Ramalina* spp. (69 sítios +; posicionamento via satélite – GPS).

[50,48], podendo ser tal que $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Ni^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^{+}$, com algumas variações pontuais. Em ordem a evitar qualquer alteração do balanço iónico da parede durante a eluição da fracção superficial e intercelular, o doseamento desta foi feito mediante um procedimento diferencial (indirecto) como segue.

Réplicas de 180-200 mg de peso seco (p.s.) são agitadas por duas vezes em 10 ml de $NiCl_2$ (20 mM) durante 40 e 30 min, de modo a eluir por permuta iónica os catiões ligados à parede e membrana celulares, e a remover por dissolução os elementos simplesmente depositados à superfície: assim, esta fracção – designada por Ni_{Total} – representa todo o teor extracelular nos elementos de interesse. Determina-se o peso seco das réplicas, as quais são depois agitadas em 10 ml de HNO_3 (1 M) durante 1.5 h para obter a fracção intracelular e, com esta, os iões presentes no interior da célula.

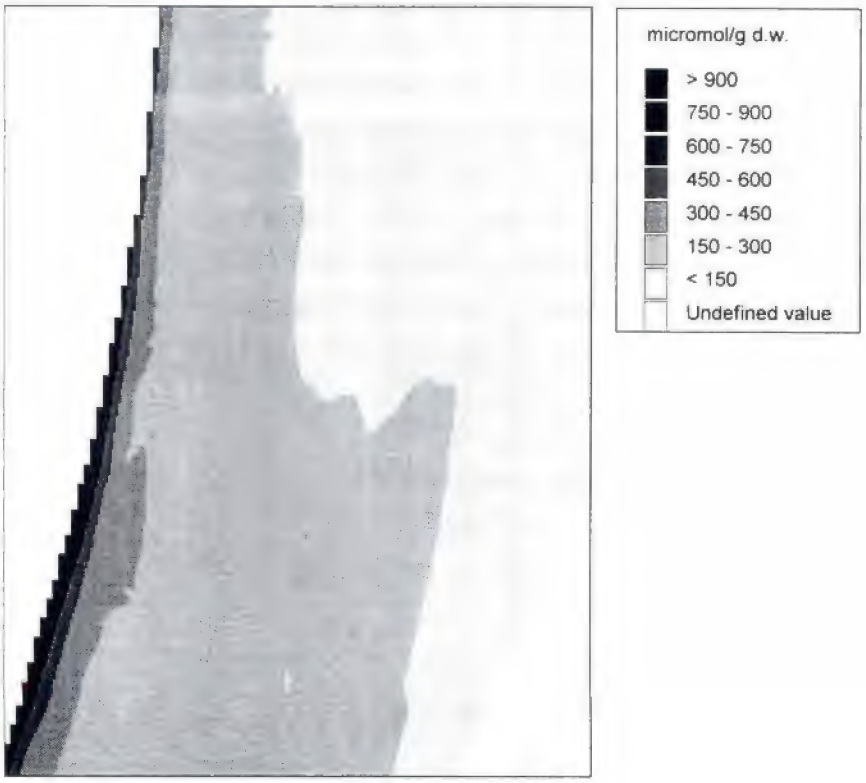
TÉCNICA, n.º 3 SET. 96

Novas réplicas são depois submetidas a uma lavagem rápida, em excesso de água bidestilada corrente, após o que se repete o passo de permuta iónica acima descrito: deste modo, e atendendo às condições de lavagem e ao carácter lábil dos elementos marinhos, a fracção obtida – agora designada por $Ni_{Lavagem}$ – contém apenas os iões deslocados da parede celular por permuta com Ni^{2+}. Nestas condições, a diferença entre Ni_{Total} e $Ni_{Lavagem}$ representa a fracção superficial e intercelular, constituída pelos catiões que se encontram depositados à superfície e nos espaços intercelulares do líquene.

Para a determinação de $[Cl^-]$ superficial e intercelular, réplicas de *ca.* 250 mg p.s. são agitadas durante 10 min (2x ≡ 5+5 min) em 10 ml de água bidestilada [33], vindo os extractos a ser doseados por titulação mercurimétrica [51]. De resto, tanto o doseamento analítico das fracções como o tratamento numérico dos respectivos resultados seguem procedimentos anteriormente descritos [37].

Análise geoestatística

As imagens obtidas para $[Cl^-]$ (superficial e intercelular) e $[Na^+]$ (extracelular) mediante krigagem com deriva externa (logaritmo da distância recta à costa) dos dados de *Ramalina* spp. até 8 km do mar constam da Figura 3. As variáveis estudadas apresentam um comportamento marcadamente não-estacionário, o qual desaconselha o uso da krigagem ordinária. Em particular, observa-se um forte gradiente negativo do teor em qualquer dos elementos com a interioridade, facto que sugere a introdução da distância à costa (ou alguma função desta) no algoritmo de estimação: com efeito, os melhores resultados – por validação cruzada (*jacknife*) [47] – vieram a ser obtidos com a deriva externa pelo logaritmo daquela distância.



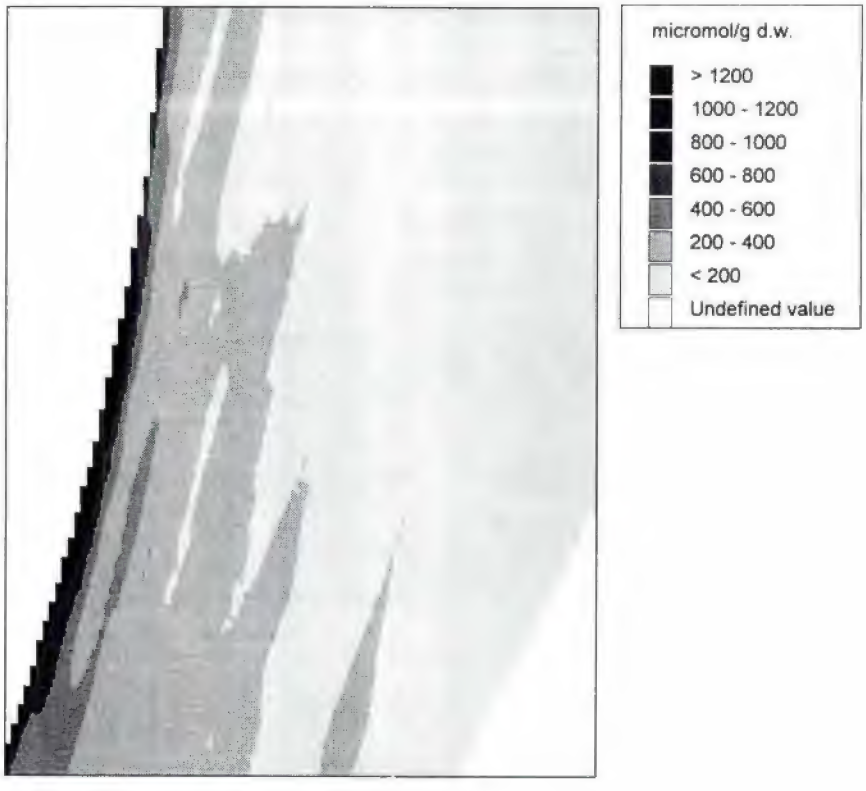


Fig. 3 Imagens da distribuição de Cl^- (←) e Na^+ (→) na zona litoral da área de estudo (até 8 km do mar), obtidas por krigagem com deriva externa (log da distância à costa) dos respectivos teores em *Ramalina* spp. (69 locais de amostragem; d.w. ≡ p.s.).

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A campanha de amostragem que está na base das imagens anteriores foi realizada em fim de Verão (Setembro), logo praticamente no culminar de um período em que não é frequente a lavagem dos líquenes pela precipitação, ocorrendo assim uma acumulação quase contínua dos elementos salinos depositados a seco. Os mapas resultantes da estimação de ambos os elementos mostram a existência de um gradiente acentuado nos primeiros 1500 m a partir da frente oceânica (em termos médios), onde se atingem concentrações superiores a 900 e 1200 mmol g^{-1} p.s. para [Cl^-] e [Na^+] em *Ramalina* spp. (p.s. ≡ peso seco de material biológico). A intrusão salina parece facilitada a sul, uma vez que se observam valores elevados até uma maior distância da costa quando comparados com os teores estimados mais a norte, o que poderá ficar a dever-se ao menor relevo encontrado na zona e ao efeito de canal de entrada para as massas de ar marítimo provocado pelas lagoas aí existentes (Melides e Santo André). Do mesmo modo, as manchas correspondentes a classes homogéneas abaixo de 150 mmol $Cl^- g^{-1}$ p.s. e 200 mmol Na^+ g^{-1} p.s. são mais extensas (largas) a norte – onde podem começar a cerca de 1 km da praia – do que a sul – onde os valores entram naquelas classes para distâncias interiores da ordem de 5 km. Refira-se ainda que, embora não se verifique grande diferença entre as distribuições elementais, o padrão correspondente ao sódio resulta mais variável, o que poderá indicar alguma outra origem para este elemento que não

só a deposição de sal marinho – mobilização de poeiras por actividades agrícolas e/ou de transporte, por exemplo.

Por outro lado, a introdução de uma variável externa como deriva no processo de krigagem dos traçadores salinos constituiu um valor acrescentado à construção e definição dos presentes mapas. A respectiva escolha nada teve de arbitrário, uma vez que a avaliação periódica da população indígena de *Ramalina* spp. ao longo de um transecto na área de estudo tem sistematica e consistentemente apontado para correlações significantes ($p < 0.05$) entre [Cl^-] e [Na^+] nos organismos e o logaritmo da distância a que os locais de colheita se encontram da costa. Aliás, um certo número de correlações essencialmente logarítmicas pode já ser encontrado em McWilliams & Sealy [52], pelo que uma tal persistência parece excluir o mero acaso da dependência funcional.

Em resumo, pode concluir-se que a presente cartografia ilustra as potencialidades da biomonitorização e da geoestatística para análise de processos ambientais. Em particular, a metodologia empregue poderá vir a constituir a base de um sistema integrado de avaliação e previsão do risco salino em áreas continentais e, por extensão, dos (das) efeitos e/ou consequências dele decorrentes – corrosividade atmosférica, por exemplo: neste caso, o diferencial custo-benefício deverá remeter para números ainda mais significativos do que os recentemente avançados por King [53] com base num protocolo de mapeamento clássico a partir de provetes metálicos e interpolação determinística (hiperbólica).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi executado e será continuado no âmbito dos contratos JNICT PEAM/C/TAI/292/93 e PBIC/C/QUI/2381/95; os autores agradecem à Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica o apoio traduzido no financiamento dos respectivos projectos. A presente versão é baseada em partes de uma comunicação à 5ª Conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente, e é aqui publicada ao abrigo da permissão genérica outorgada pela respectiva Comissão Organizadora. Agradece-se igualmente o apoio aos estudos de salinidade troposférica sempre manifestado pela Direcção Regional de Ambiente e Recursos Naturais do Alentejo (DRARN-Alentejo) e a eficiente colaboração de Ana Mata e Luísa Santos (ao tempo, alunas de Engenharia Química do IST) no processamento e análise de grande parte do material biológico.

BIBLIOGRAFIA

[1] Pacheco, A.M.G., Sousa, A.J., Figueira, R., Branquinho, C., Catarino, F. 1995. Salinidade atmosférica: um vector de risco natural. *Técnica* **1/95**, 29-33.

[2] Payer, J.H., Boyd, W.K., Dippold, D.G., Fisher, W.H. 1980. NBS-Battelle cost of corrosion study ($70 billion !) – Parts 1-7. *Mater. Performance.* **19**(5, 6, 7, 8, 9, 10, 11), 34, 19-20, 17-18, 40-41, 51-53, 27-28, 32-34.

[3] Cabrillac, C., Leach, J.S.L., Marcus, P., Pourbaix, A. 1987. The cost of corrosion in the EEC. *Metals and Materials* **3**(9), 533-536.

[4] Staff feature 1995. A 1995 update by Battelle on metallic corrosion costs. *Mater. Performance.* **34**(9), 12.

[5] Woodcock, A.H., Gifford, M.M. 1949. Sampling atmospheric sea-salt nuclei over the ocean. *J. marine Res.* **8**, 177-197.

[6] Woodcock, A.H. 1950. Impact deposition of atmospheric sea salts on a test plate. *Proc. ASTM* **50**, 1151-1166.

[7] Woodcock, A.H. 1950. Sea salt in a tropical storm. *J. Meteorol.* **7**, 397-401.

[8] Woodcock, A.H. 1953. Salt nuclei in marine air as a function of altitude and wind force. *J. Meteorol.* **10**, 362-371.
[9] McDonald, R.L., Unni, C.K., Duce, R.A. 1982. Estimation of atmospheric sea salt dry deposition: wind speed and particle size dependence. *J. geophys. Res.* **87**, 1246-1250.
[10] Edney, E.O., Stiles, D.C., Corse, E.W., Wheeler, M.L., Spence, J.W., Haynie, F.H., Wilson Jr., W.E. 1988. Field study to determine the impact of air pollutants on the corrosion of galvanized steel. *Mater. Performance* **27**(3), 47-50.
[11] Möller, D. 1990. The Na/Cl ratio in rainwater and the seasalt chloride cycle. *Tellus* **42B**, 254-262.
[12] Hultberg, H., Grennfelt, P. 1992. Sulphur and seasalt deposition as reflected by throughfall and runoff chemistry in forested catchments. *Environ. Pollut.* **75**, 215-222.
[13] Li, Y.-H. 1992. Seasalt and pollution inputs over the continental United States. *Water, Air, and Soil Pollut.* **64**, 561-573.
[14] Spriet, J.A., Ghislain, C.V. 1982. *Computer-aided Modelling and Simulation.* Academic Press, New York.
[15] Ohba, R., Okabayashi, K., Yamamoto, M., Tsuru, M. 1990. A method for predicting the content of sea salt particles in the atmosphere. *Atmos. Envir.* **24A**, 925-935.
[16] Rühling, A., Tyler, G. 1971. Regional differences in the deposition of heavy metals over Scandinavia. *J. appl. Ecology* **8**, 497-507.
[17] Folkeson, L. 1979. Interspecies calibration of heavy-metal concentrations in nine mosses and lichens: – Applicability to deposition measurements. *Water, Air, and Soil Pollut.* **11**, 253-260.
[18] Pilegaard, K. 1979. Heavy metals in bulk precipitation and transplanted *Hypogymnia physodes* and *Dicranoweisia cirrata* in the vicinity of a Danish steelworks. *Water, Air, and Soil Pollut.* **11**, 77-91.
[19] Nieboer, E., Richardson, D.H.S. 1981. Lichens as monitors of atmospheric deposition, in *Atmospheric Pollutants in Natural Waters*, (J. Eisenreich, Ed.). Ann Arbor Science, Ann Arbor MI (USA), pp. 339-388.
[20] Martin, M.H., Coughtrey, P.J. 1982. *Biological Monitoring of Heavy Metal Pollution.* Applied Science Publishers, London.
[21] Lawrey, J.D., Hale Jr, M.E. 1988. Lichen evidence for changes in atmospheric pollution in Shenandoah National Park, Virginia. *Bryologist* **91**, 21-23.
[22] Puckett, K.J. 1988. Bryophytes and lichens as monitors of metal deposition. *Bibl. Lichenol.* **30**, 231-267.
[23] Rope, S.K., Pearson, L.C. 1990. Lichens as air pollution biomonitors in a semiarid environment in Idaho. *Bryologist* **93**, 50-61.
[24] Kansanen, P.H., Venetvaara, J. 1991. Comparison of biological collectors of airborne heavy metals near ferrochrome and steel works. *Water, Air, and Soil Pollut.* **60**, 337-359.
[25] Sloof, J.E., Wolterbeek, H.Th. 1991. Patterns in trace elements in lichens. *Water, Air, and Soil Pollut.* **57-58**, 785-795.
[26] Sloof, J.E., Wolterbeek, H.Th. 1992. Lichens as biomonitors for radiocesium following the Chernobyl accident. *J. envir. Radioact.* **16**, 229-242.
[27] Sloof, J.E. 1995. Lichens as quantitative biomonitors for atmospheric trace-element deposition, using transplants. *Atmos. Envir.* **29**, 11-20.
[28] Nylander, W. 1866. Les lichens du Jardin de Luxembourg. *Bull. Soc. Bot. Fr.* **13**, 364-372.
[29] Nimis, P.L. 1990. Air quality indicators and indices: the use of plants as bioindicators for monitoring air pollution, in *EUR 13060 EN Report.* Commission of the European Communities, Luxembourg, pp. 93-126.
[30] Fletcher, A. 1976. Nutritional aspects of marine and maritime lichen ecology, in *Lichenology: Progress and Problems* (D.H. Brown, D.L. Hawksworth, R.H. Bailey, Eds.). Academic Press, London, pp. 359-384.
[31] Larson, D.W., Matthes-Sears, U., Nash III, T.H. 1986. The ecology of *Ramalina menziesii.* II. Variation in water relations and tensile strength across an inland gradient. *Can. J. Bot.* **64**, 6-10.
[32] Nash III, T.H., Lange, O.L. 1988. Responses of lichens to salinity: concentration and time-course relationships and variability among Californian species. *New Phytol.* **109**, 361-367.
[33] Brown, D.H., Di Meo, J.A. 1972. Influence of local maritime conditions on the distribution of two epiphytic lichens. *Lichenologist* **5**, 305-310.

TECNICA n° 3 SET. 96

[34] Puckett, K.J., Finegan, E.J. 1980. An analysis of the element content of lichens from the Northwest Territories, Canada. *Can. J. Bot.* **58**, 2073-2089.
[35] Takala, K., Olkkonen, H., Jääskeläinen, J., Selkäinaho, K. 1990. Total chlorine content of epiphytic and terricolous lichens and birch bark in Finland. *Ann. Bot. Fennici* **27**, 131-137.
[36] Figueira, R., Pacheco, A.M.G., Sousa, A.J., Branquinho, C., Catarino, F. 1995. Short-term assessment of epiphytic lichens as saltfall biomonitors: calibration of transplants. *Ecotoxicology and Environmental Restoration* (submetido).
[37] Figueira, R., Branquinho, C., Pacheco, A.M.G., Sousa, A.J., Catarino, F. 1994. Desenvolvimento de biomonitores de salinidade atmosférica. *Actas da 4.ª Conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente (Lisboa)* **II**, M36-M48.
[38] Journel, A.G., Huijbregts, J.C. 1978. *Mining Geostatistics.* Academic Press, London.
[39] Cressie, N. 1991. *Statistics for Spatial Data.* Wiley, New York.
[40] Matheron, G. 1962. *Traité de Géostatistique Appliquée.* Technip, Paris.
[41] Matheron, G. 1965. *Les Variables Régionalisées et leur Estimation.* Masson, Paris.
[42] Delhomme, J.P. 1979. *Étude Géostatistique de la Géométrie du Réservoir de Chemery à partir des Données Sismiques et de Sondage (Tech. Rep. LHM/RD/79/41).* École des Mines de Paris, Fontainebleau.
[43] Moinard, L. 1987. Application of kriging to the mapping of a reef from wireline logs and seismic data: a case history, in *Geostatistical Case Studies* (G. Matheron, M. Armstrong, Eds.). D. Reidel, Hingham MA (USA), pp. 93-104.
[44] Galli, A., Meunier, G. 1987. Study of a gas reservoir using the external drift method, in *Geostatistical Case Studies* (G. Matheron, M. Armstrong, Eds.). D. Reidel, Hingham MA (USA), pp. 105-120.
[45] Ahmed, S., Marsily, G. 1987. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resour. Res.* **23**, 1717-1737.
[46] Hudson, G. 1993. Kriging temperature in Scotland using the external drift method, in *Geostatistics Tróia '92, Vol. 2.* (A. Soares, Ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 577-588.
[47] Wackernagel, H. 1995. *Multivariate Geostatistics.* Springer-Verlag, Berlin.
[48] Brown, D.H., Wells, J.M. 1988. Sequential elution technique for determining the cellular location of cations, in *Methods in Bryology – Proceedings of the Bryological Methods Workshop, Mainz* (J.M. Glime, Ed.). Hattori Botanical Laboratory, Nichinan, pp. 227-233.
[49] Brown, D.H., Buck, G.W. 1985. The celular location of metals in two bryophytes and a lichen. *Cryptogamie, Bryol. Lichénol.* **6**, 279-286.
[50] Puckett, K.J., Nieboer, E., Gorzynski, M.J., Richardson, D.H.S. 1973. The uptake of metal ions by lichens: a modified ion-exchange process. *New Phytol.* **72**, 329--342.
[51] Schales, O., Schales, S.S. 1941. A simple and accurate method for the determination of chloride in biological fluids. *J. biol. Chem.* **140**, 879-884.
[52] McWilliams, E.L., Sealy, R.L. 1987. Atmospheric chloride: its implication for foliar uptake and damage. *Atmos. Envir.* **21**, 2661-2665.
[53] King, G.A. 1995. Corrosivity mapping – a novel tool for materials selection and asset management. *Mater. Performance.* **34**(1), 6-9.

MÉTODO DE VODC: MÉTODO ALTERNATIVO AO MÉTODO DOS MULTIPLICADORES INDETERMINADOS DE LAGRANDE PARA SISTEMAS ANHOLÓNOMOS

Óscar João Campos Dias
Vitor Manuel dos Santos Cardoso

Original Submetido em: 16 de Abril de 1996

RESUMO

Neste artigo, é apresentado um novo método (método de VODC), que permite obter as equações do movimento dos sistemas anholónomos de uma maneira mais simples que a do método dos multiplicadores indeterminados de Lagrange.
Este método tem, ainda, a vantagem de permitir aplicar a formulação Hamiltoniana a sistemas anholónomos.

ABSTRACT

In this article, it's presented a new method (VODC's method), which allows to obtain the motion equations for nonholonomic systems in an easiest way than the Lagrange undetermined multipliers' method.
This method has, yet, the advantage of allowing the application of the Hamiltonian formulation to nonholonomic systems.

1. PANORAMA ACTUAL

Em Física Clássica, quando temos um sistema de N partículas, as leis de Newton, em particular $m_i\ddot{x}_i = F_i^{(exterior)} + \sum_j F_{ji}$; $EQS(1)$, permitem obter as equações do movimento do sistema. Este processo, no entanto, nem sempre é simples, principalmente quando é necessário levar em conta as ligações que limitam o movimento do sistema. As ligações introduzem dois tipos de dificuldades na resolução dos problemas mecânicos. Primeiro, as coordenadas $x_i's$ não são independentes uma vez que, estão relacionadas pelas equações de ligação e, portanto, as equações do movimento (EQS 1) não são todas independentes. Segundo, as forças de ligação não são fornecidas à priori sendo também incógnitas do problema. De facto, impor ligações no sistema é simplesmente uma outra maneira de dizer que há forças presentes no problema que não podem ser especificadas directamente mas, que são conhecidas pelos seus efeitos no movimento do sistema. Geralmente as ligações são classificadas em *holónomas* e *anholónomas*. Dizem-se *holónomas* quando as condições de ligação podem ser expressas como equações relacionando as coordenadas da partícula (e possivelmente o tempo) da forma: $\phi(x_1;x_2;\cdots;t)=0$, isto é, quando as equações de ligação são integráveis. Dizem-se *anholónomas* caso contrário.

No caso de as ligações presentes no sistema serem todas *holónomas*, a primeira dificuldade atrás indicada pode ser resolvida através da introdução de coordenadas generalizadas. De facto, dado um sistema com 3N coordenadas cartesianas e K equações de ligação, pode-se usar as K equações de ligação para eliminar K das 3N coordenadas dependentes obtendo-se 3N-K coordenadas independentes. Este processo equivale a introduzir novas 3N-K coordenadas independentes $q_i's$, em termos das quais as antigas 3N coordenadas $x_i's$ são expressas pelas designadas *equações de transformação* da forma: $x_i = x_i(q_1;\cdots;q_{3N-K};t)$; com i=1;....;3N, que contêm as condições de ligação implicitamente.

Lagrange introduziu o conceito de deslocamento virtual infinitesimal **dr** correspondendo a uma alteração na configuração do sistema como resultado de qualquer alteração infinitesimal das coordenadas, consistente com as forças e ligações impostas no sistema num dado instante t. Este deslocamento distingue-se do deslocamento real infinitesimal **dr** pelo facto, deste último ocorrer num intervalo de tempo dt durante o qual as forças e ligações se podem alterar.

Lagrange, usando o *princípio D'Alembert* e, mais tarde, *Hamilton*, usando o *princípio de Hamilton*, deduziram então as *equações de Lagrange*:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right)-\frac{\partial L}{\partial q_j}=0 \quad \text{com L=T-U e j=1;...;3N-K.}$$

Estas equações são válidas para sistemas *holónomos* e para os quais as forças generalizadas $Q_j's$ são *monogénicas*, isto é, são funções de um potencial generalizado $U(q_j;\dot{q}_j)$ do tipo:

$$Q_j=-\frac{\partial U}{\partial q_j}+\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial U}{\partial \dot{q}_j}\right)$$

Estas *equações de Lagrange* constituem as equações do movimento do sistema alternativas às *equações de Newton*, tendo a vantagem de eliminar as dificuldades atrás indicadas.

Se as ligações são *anholónomas*, as equações de ligação não podem ser usadas para eliminar as coordenadas dependentes, pois não são integráveis.

No caso particular, muito comum, de as equações de ligação serem da forma de equações diferenciais lineares de primeira ordem do tipo: $\sum_j a_{lj}\,dq_j+a_{lt}dt=0$; *l*=1;...;K, *Lagrange* introduziu estas equações no problema juntamente com as equações diferenciais do movimento e conseguiu eliminar as equações dependentes, usando para tal, o *método dos multiplicadores indeterminados de Lagrange*. As equações do movimento para sistemas *anholónomos* e *monogénicos* deduzidas por *Lagrange são*:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{d\dot{q}_j}\right)-\frac{\partial L}{\partial q_j}=\sum_l \lambda_l a_{lj}$$

$$\sum_j a_{lj}\dot{q}_j+a_{lt}=0 \qquad com \left|\begin{array}{l} j=1;\cdots;n \\ l=1;\cdots;K \end{array}\right. \qquad \text{(EQS 2)}$$

A dedução destas equações encontra-se no livro: *"CLASSICAL MECHANICS "* de *Herbert Goldstein* no capítulo *" **2-4** Extension of Hamilton's Principle to nonholonomic systems"*. Recomendamos vivamente uma releitura desta dedução, para que haja uma melhor compreensão do trabalho que a seguir apresentaremos.

Estas *equações de Lagrange* constituem um sistema de n+K equações com n+K incógnitas. Seria lícito dizer que em cada instante o número de *graus de liberdade* é n-K mas, como as ligações *anholónomas* não são completamente integráveis foi impossível, até ao momento, usá-las para baixar o número de coordenadas para n-K coordenadas independentes. É preciso continuar a usar n coordenadas dependentes. Se se conseguisse baixar o número de *graus de liberdade* para n-K, do ponto de vista prático, seria muito útil, pois obteríamos n-K equações com n-K incógnitas em vez de termos de trabalhar com n+K equações e n+K incógnitas, como acontece se tivermos de trabalhar com as equações (EQS 2).

2. MÉTODO DE VODC

É objectivo deste trabalho demonstrar um novo método que permite reduzir o número de *graus de liberdade* para n-K, quando as equações de ligação são diferenciais, lineares e de primeira ordem.

Na bibliografia dedicada ao assunto, dado um sistema com n coordenadas e com K ligações *holónomas*, escolhem-se n-K das coordenadas para independentes ($q_j's$) e as restantes K (designadas dependentes) surgem como funções destas do tipo: $x_i = x_i(t;q_1;\cdots;q_{3n-K})\ com\ i = 1;\cdots;K$ (designadas *equações de transformação*).

Neste trabalho, para um sistema com n coordenadas e K ligações *anholónomas* e, tendo em vista o objectivo a que nos propusemos, vamos introduzir uma *"nova" definição de equação de transformação de coordenadas*. Assim, escolhem-se n-K das coordenadas, que se passam a designar de independentes ($q_j's$) e as restantes K (agora designadas dependentes ($x_i's$)) surgem como função das independentes do tipo: $dx_i = dx_i(dt;dq_1;\cdots;dq_{n-K};q_1;\cdots;q_{n-K})$; $i = 1;\cdots;K$ (*"novas" equações de transformação*). O leitor verificará que a importância atribuída a estas "novas" equações de transformação (repare-se que, agora, estas relacionam também as diferenciais das coordenadas e não só as próprias coordenadas) constitui o cerne deste novo método.

As n-K coordenadas independentes não podem, no entanto, ser escolhidas arbitráriamente. A sua escolha tem de obedecer à restrição de que os potenciais presentes no problema só podem ser função das coordenadas independentes (e possivelmente da primeira derivada temporal de qualquer das n coordenadas: $U = U(q_j;\dot{q}_j;\dot{x}_i)$) e jamais das dependentes. Caso contrário, a resolução do problema usando as novas equações torna-se impossível.

EXEMPLO:

Suponhamos que a ligação de rolamento sem deslizamento num plano inclinado: $rd\theta - dx = 0$ era *anholónoma* e, portanto, não a podemos integrar. Se escolhêssemos θ para coordenada independente ter-se-ia $dx = rd\theta$. Ora $U = mg(l - x)Sen\alpha$ e x não poderia ser obtido como função de θ logo o problema não seria resolúvel.

Se, no entanto, escolhermos x para independente, o nosso método já pode ser aplicado sem problema.

Esta restrição, embora muito importante, não é, no entanto, muito preocupante, pois na maior parte das situações práticas que a natureza nos coloca, a escolha anterior é possível.

Dada esta escolha, pode-se então redefinir o Lagrangiano como função somente das coordenadas independentes $q_j's$: $L = L(q_j;\dot{q}_j;t)\ \ com\ \ j = 1;\cdots;n-K$.

Correctamente redefinido o Lagrangiano, vamos agora deduzir as novas equações que permitem obter o movimento para sistemas *anholónomos* e *monogénicos*, sem o recurso aos K *multiplicadores de Lagrange*.

Podemos postular, em virtude da confirmação experimental (e tal como a bibliografia o faz quando pretende deduzir as *equações de lagrange* aplicadas a sistemas *anholónomos*), que o movimento que a natureza escolhe é aquele para o qual a *acção de Hamilton* é mínima *(princípio de Hamilton)*:

$$\delta\int_{t}^{t} L dt = 0 \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \quad \delta\int_{t}^{t} L(q_j;\dot{q}_j;t)dt = 0 \quad ; j = 1;\cdots;n-K \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \quad \int_{t}^{t} \sum_{j}\left(\frac{\partial L}{\partial q_j} - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\delta\dot{q}_j\right)dt = 0 \quad \Leftrightarrow$$

integrando por partes o segundo termo tem-se:

$$\Leftrightarrow \quad \sum_{j}\left(\left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\delta q_j\right]_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2}\left[\frac{\partial L}{\partial q_j} - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right)\right]\delta q_j dt\right) = 0 \quad \Leftrightarrow$$

o primeiro termo da express o anterior zero porque $q_{(t1)}$ *e* $q_{(t2)}$ *s o fixos* $\Rightarrow \delta q_{(t1)} = \delta q_{(t2)} = 0$

$$\Leftrightarrow \quad \sum_{j}\left(\int_{t_1}^{t_2}\left[\frac{\partial L}{\partial q_j} - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right)\right]\delta q_j dt\right) = 0$$

Ora, a reflexão preliminar que fizemos permite-nos afirmar que os δq_j's são independentes e o integral anterior deverá ser válido para valores arbitrários de δq_j, só sendo isto possível se:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = 0 \quad com\ j = 1;\cdots;n-K$$

Estas n-K equações diferenciais permitem obter as equações do movimento para sistemas *anholónomos* e *monogénicos* usando somente n-K *graus de liberdade* (que especificam o problema), atingindo-se assim,o objectivo a que este trabalho se propôs. Por vezes, na resolução destas equações, também será útil analisar o lagrangiano expresso em função das coordenadas dependentes (ver: "EXEMPLO DE APLICAÇÃO").

Ao método que nos permitiu chegar a estas equações designaremos por ***"Método de VODC".***

Se quisêssemos, poderiamos usar as K equações de ligação: $\sum_{i} a_{li}\dot{x}_i + a_{lt} = 0 \quad com \left|\begin{matrix} i=1;\cdots;n \\ l=1;\cdots;K \end{matrix}\right.$ para obter a evolução temporal das K coordenadas dependentes.

Este método tem, em relação ao *método dos multiplicadores indeterminados de Lagrange*, a desvantagem de não permitir determinar as forças de ligação (estas são o significado físico atribuído aos multiplicadores de Lagrange), no entanto, a prioridade é obter o mais facilmente possível as equações do movimento. Aliás, quando o sistema é holónomo, usa-se o método de Lagrange para sistemas holónomos para obter "só" as equações do movimento e, caso se queira conhecer as forças de ligação, recorre-se, então, ao método dos multiplicadores de Lagrange.

A grande vantagem do método de VODC encontra-se, no entanto, no facto de permitir aplicar a formulação Hamiltoniana a sistemas anholónomos e monogénicos. A formulação Hamiltoniana, do ponto de vista da obtenção da solução dos problemas mecânicos, não introduz grandes inovações em relação à formulação Lagrangiana mas, constitui uma ferramenta de trabalho poderosa para desenvolvimentos teóricos em diversas áreas da Física, como a teoria de Hamilton-Jacobi, a teoria das Perturbações, a Física Estatística, a Mecânica Quântica, etc.

Até agora, a formulação Hamiltoniana aplicava-se somente a sistemas *holónomos* e *monogénicos* (baseamo-nos na bibliografia apresentada). Com o

método de VODC o mesmo formalismo poderá ser aplicado a sistemas *anholónomos* e *monogénicos*. Este formalismo encontra-se na secção " **8-1** *Legendre Transformations and the Hamilton Equations of Motion* " de *Goldstein*[1]

Assim, o Hamiltoniano para um sistema anholónomo é também obtido por uma transformação de Legendre, sendo dado por:

$$H(q_j;p_j;t)=\sum_i \dot{q}_j p_j - L(q_j;\dot{q}_j;t) \quad com \quad j=1;\cdots;n-K$$

e as 2(n-K)+1 *equações canónicas de Hamilton são:*

$$\begin{cases} \dot{q}_j = \dfrac{\partial H}{\partial p_j} \\ \dot{p}_j = -\dfrac{\partial H}{\partial q_j} \\ \dfrac{\partial L}{\partial t} = -\dfrac{\partial H}{\partial t} \end{cases} \qquad com \quad j=1;\cdots;n-K$$

Todos os benefícios da formulação Hamiltoniana poderão, agora, ser aplicados a sistemas anholónomos.

3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Vamos apresentar o exemplo, da secção " **1-3** *Constraints* " do *Goldstein*[1] de um disco vertical rodando num plano horizontal e ao qual acrescentaremos o potencial $U(y)=ky$.

a) USANDO O MÉTODO DOS MULTIPICADORES INDETERMINADOS DE LAGRANGE:

Lagrangiano: $L(x;y;\theta;\phi)=\frac{1}{2}m\dot{x}^2+\frac{1}{2}m\dot{y}^2+\frac{1}{2}I\dot{\phi}^2+ky$

Determinação dos coeficientes indeterminados de Lagrange:

$$\begin{cases} \lambda_1(dx - aSen\theta d\phi)=0 \\ \lambda_2(dy + aCos\theta d\phi)=0 \end{cases}$$

Equações do movimento:

·Equações de Lagrange:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right)-\dfrac{\partial L}{\partial x}=\lambda_1 \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial L}{\partial \dot{y}}\right)-\dfrac{\partial L}{\partial y}=\lambda_2 \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial L}{\partial \dot{\phi}}\right)-\dfrac{\partial L}{\partial \phi}=-\lambda_1 aSen\theta+\lambda_2 aCos\theta \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right)-\dfrac{\partial L}{\partial \theta}=0 \end{cases}$$

Equações de ligação:

$$\begin{cases} \dot{x}-\dot{\phi}aSen\theta=0 \\ \dot{y}+\dot{\phi}aCos\theta=0 \end{cases}$$

Temos; assim; um sistema de n+K equações e n+K variáveis $(x;y;\phi;\lambda_1;\lambda_2)$

b) USANDO O MÉTODO DE VODC:

·Lagrangiano em função das coordenadas dependentes (n=2):

$$L(x;y;\theta;\phi)=\frac{1}{2}m\dot{x}^2+\frac{1}{2}m\dot{y}^2+\frac{1}{2}I\dot{\phi}^2+ky$$

·Equações de ligação (K=2):

$$\begin{cases} dx-aSen\theta d\phi=0 \\ dy+aCos\theta d\phi=0 \end{cases}$$

Existem n-K=2 coordenadas independentes. Como o potencial é função da coordenada 'y',esta coordenada tem de ser escolhida para independente. A segunda coordenada independente poderá ser escolhida arbitráriamente. Seja θ .

·Equações de transformação:

$$\begin{cases} dx=-dyTg\theta \\ d\phi=-\dfrac{1}{aCos\theta}dy \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}=\dot{y}Tg\theta \\ \dot{\phi}=-\dfrac{1}{aCos\theta}\dot{y} \end{cases}$$

·Lagrangiano em função das coordenadas independentes:

$$\mathbf{L}(y;\theta)=\left[\frac{1}{2}mTg^2\theta+\frac{1}{2}m+\frac{1}{2}\frac{I}{a^2}\left(1+Tg^2\theta\right)\right]\dot{y}^2+ky$$

·Equações do movimento:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial \mathbf{L}}{\partial \dot{y}}\right)-\dfrac{\partial \mathbf{L}}{\partial y}=0 \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial \mathbf{L}}{\partial \dot{\theta}}\right)-\dfrac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta}=0 \end{cases}$$

Temos,assim, um sistema de n-K equações e n-K variáveis (y, θ).

O leitor verificará que a resolução analítica destas equações é tarefa difícil. No entanto, verificamos que no lagrangiano $L(x;y;\phi;\theta)$, a coordenada θ é cíclica, isto é, não aparece no lagrangiano e, portanto, tem-se: $\dot{\theta}=\omega=cons^{te}$ e $\theta=\theta_0+\omega t$. Estas equações, que fornecem a evolução temporal da coordenada θ independentemente do lagrangiano considerado, podem ser introduzidas nas equações anteriores tornando a sua resolução fácil. Este artifício pode ser usado em muitos problemas semelhantes.

Podemos, agora, aplicar a formulação Hamiltoniana ao problema:

·Determinação dos momentos generalizados:

$$\begin{cases} p_y=\dfrac{\partial \mathbf{L}(\mathbf{y;q;t})}{\partial \dot{y}} \\ p_\theta=\dfrac{\partial \mathbf{L}(\mathbf{y;q;t})}{\partial \dot{\theta}} \end{cases}$$

·Definição do Hamiltoniano:

$$H(y;p_y;\theta;p_\theta;t)=(\dot{y}\,p_y+\dot{\theta}\,p_\theta)-\mathbf{L}(\mathbf{y;q;t})$$

·Equações canónicas de Hamilton:

$$\begin{cases} \dot{y}=\dfrac{\partial H}{\partial p_y}\ ; \quad \dot{\theta}=\dfrac{\partial H}{\partial p_\theta} \\ \dot{p}_y=-\dfrac{\partial H}{\partial y}\ ; \quad \dot{p}_\theta=\dfrac{\partial H}{\partial \theta} \\ \dfrac{\partial \mathbf{L}}{\partial t}=-\dfrac{\partial H}{\partial t} \end{cases}$$

Uma nota final. No caso de o número de coordenadas (r) presentes no potencial do problema ser maior que o número de graus de liberdade (n-K), o *método de VODC* pode ser combinado com o *método dos multiplicadores indeterminados de Lagrange* para simplificar o problema. De facto, uma reflexão permitirá concluir que, com esta combinação, só necessitamos de $r-(n-K)(K$ multiplicadores de Lagrange e de $r \leq n$ equações de Lagrange.

BIBLIOGRAFIA:

[1] GOLDSTEIN, HERBERT, *Classical Mechanics.*

[2] JACKSON, JOHN DAVID, *Classical Electrodynamics.*

[3] LANDAU, L. D., and LIFSITZ, E. M., *Mechanics.*

Óscar Dias e *Vitor Cardoso* são alunos do 3.º ano de Engenharia Física Tecnológica do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Original submetido para publicação em 15 de Abril de 1996.

DIFERENCIÁLIS
Informática, Lda.

CONSULTADORIA

ESTUDOS DE INFORMATIZAÇÃO E ACTUALIZAÇÃO

SOFTWARE

INTERNACIONAL, GESTÃO, DESENVOLVIMENTO À MEDIDA

HARDWARE

COMPUTADORES, IMPRESSORAS, SCANNERS, MULTIMÉDIA

CONSUMIVEIS

RATOS, TINTEIROS PARA JACTO DE TINTA, DISQUETES...

FORMAÇÃO

PRODUTOS MICROSOFT, LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO

Rua de Entrecampos n.° 64 C - 1700 Lisboa
Telef.: 796 83 26 – Fax: 796 92 79

Palavras-chave: visualização/imagem; mecanismos de atomização; desintegração do filme de líquido
Keywords: visualization/imaging; atomization mechanisms; liquid film disintegration

ATOMIZAÇÃO DE LÍQUIDOS EM INJECTORES PARA BAIXA PRODUÇÃO DE POLUENTES

Isabel S. Carvalho e Manuel V. Heitor
Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica
Original Submetido em: 26 de Abril de 1996

RESUMO

O mecanismo de atomização de líquidos numa camada de corte axissimétrica formada pela interacção de dois jactos turbulentos coaxiais é estudado com base em resultados obtidos através da utilização de um conjunto de técnicas ópticas de diagnóstico, nomeadamente técnicas de visualização. O trabalho foi realizado à escala laboratorial e utilizou como fluidos ar e água à temperatura ambiente, permitindo obter informação relevante para o desenvolvimento de novos atomizadores a usar em aeronáutica e propulsão.
Os resultados obtidos quantificam o efeito da velocidade do ar primário de atomização, da velocidade e do nível de rotação do ar secundário, do caudal e da espessura do filme de líquido no processo de desintegração do líquido e na qualidade de atomização. Identificaram-se cinco regimes de atomização, estando o mecanismo de desintegração do filme de líquido associado a um processo periódico.

ABSTRACT

The process of liquid atomization downstream of a prefilming airblast nozzle is reported making use of laser shadowgraphy and a high speed CCD camera. The analysis is directed towards a detailed investigation of the break-up of an annular liquid film in the presence of co-flowing air with and without swirl, with the ultimate objective of improving knowledge of the atomization of liquid fuels in practical combustors.
The experiments were conducted in turbulent flows using water and air at room tempera-

1. INTRODUÇÃO

O crescente interesse no controlo da emissão de poluentes derivados quer de câmaras de combustão em turbinas a gás e de motores de combustão interna, quer de sistemas de queima em instalações industriais, tem originado nas duas últimas décadas uma renovada atenção em relação à compreensão de processos de combustão e ao desenvolvimento de técnicas de controlo de processos de atomização e de queima de combustíveis líquidos (Lawn, 1987; Culick et al., 1996). De facto, os processos de atomização e evaporação de um combustível líquido são de importância fundamental em sistemas de combustão. Por exemplo, os combustíveis comuns não são suficientemente voláteis de modo a produzir quantidades de vapor necessárias para a ignição e combustão, a não ser que se encontrem convenientemente atomizados num vasto número de gotas, correspondente a um elevado aumento de área superficial. Quanto menor fôr o diâmetro das gotas, maior será a taxa de evaporação. Adicionalmente, a qualidade de atomização afecta os limites de estabilidade, a eficiência de combustão e os níveis de emissão de fumos, monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados.

A função do atomizador é a de desintegrar o líquido e projectar e dispersar as gotas resultantes numa direcção preferencial. Os atomizadores produzem pequenas gotas de líquido injectando um jacto de diâmetro reduzido ou aumentando a área superficial de uma folha de líquido até que ela se torne instável e se desintegre, como ilustrado na Figura 1. O mecanismo é obviamente dependente do tipo de atomizador utilizado e das propriedades do líquido, e estudos anteriores (Lefebvre, 1989) têm mostrado que gotas de diâmetro reduzido são obtidas com geometrias que promovem uma interacção máxima entre o ar e o líquido.

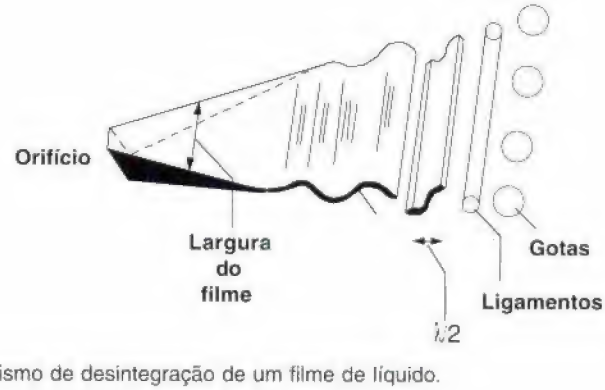


Fig. 1 Mecanismo de desintegração de um filme de líquido.

Poucos têm sido os estudos dedicados à análise da ruptura e processo de atomização em filmes de líquido cilíndricos, assim como de processos periódicos (Camatte e Ledoux, 1990, 1991; Camatte, 1992) associados ao fenómeno de desintegração de jactos e filmes de líquido, embora esta geometria esteja a ser utilizada em sistemas de atomização reais (Zheng e Jasuja, 1994).

Neste contexto, o objectivo final do trabalho aqui apresentado é o de analisar a possibilidade de actuação nas geometrias e nas características do escoamento típico de injectores de interesse prático, de modo a obter os níveis de mistura desejados. Este trabalho está particularmente direccionado para a análise do desempenho de atomizadores do tipo "airblast" com utilização em câmaras de combustão de turbinas a gás, para baixa emissão de poluentes. Em particular, são estudados jactos turbulentos coaxiais na presença e ausência de um filme de líquido, de forma a estudar a qualidade de atomização para diferentes condições de funcionamento típicas de injectores do tipo "airblast" com pré-filme (Lefebvre, 1980, 1983). Esta configuração tem vindo, recentemente, a ser objecto de inúmeros estudos devido às suas características promissoras no que diz respeito à eficiência de atomização e redução de poluentes, com particular aplicação na indústria aeronáutica (Joos e Pellischek, 1995).

Este artigo encontra-se dividido em quatro partes incluindo esta Introdução. A secção 2 é dedicada à descrição do método experimental utilizado, descrevendo-se a instalação experimental usada e referindo-se as técnicas experimentais usadas para a visualização do escoamento. A secção 3 é dedicada à apresentação e análise dos resultados, e inclui a discussão da influência da velocidade do ar de atomização, assim como do uso de rotação na "qualidade da atomização". Na última secção, resumem-se as conclusões mais relevantes deste estudo.

ture. The liquid flow rate, the velocity ratio and the film thickness strongly affect the time and length scales of the break-up mechanism for reduced inner-air velocities (U_i < 40 m/s). For higher inner air velocities, the break-up length and time become less dependent on liquid flow rate and initial film thickness. The results show that the deterioration of the liquid film close to the atomizing edge of the nozzle is associated with a periodic process mainly dependent on the primary air velocity.

2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO

2.1. Instalação Experimental

A instalação experimental utilizada neste trabalho encontra-se instalada na Secção de Termodinâmica Aplicada do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, e foi concebida de modo a possibilitar o estudo de diferentes tipos de atomizadores comerciais, assim como de modelos laboratoriais. O atomizador em relação ao qual se apresentam alguns resultados, encontra-se representado na Figura 2, sendo constituído por três cones coaxiais: i) um cone interior com um diâmetro de 5 mm; ii) um cone intermédio para alimentação de água que pode originar a formação de filmes de líquido de espessuras de 0.2 e 0.7 mm; e iii) um cone exterior com um diâmetro de 40 mm. Para a geração de rotação no ar de atomização recorre-se a uma câmara de rotação com um número de entradas tangenciais variável. O atomizador está montado na vertical, encontrando-se fixo. Sob o atomizador foi colocada uma mesa de atravessamento 3-D.

O sistema de alimentação de líquido utiliza água como fluido, sendo a sua alimentação efectuada em circuito fechado, utilizando-se uma bomba associada ao tanque de água. O caudal de líquido foi medido em rotâmetros, previamente calibrados, estimando-se para este caudal um erro de aproximadamente 1%. Todos os testes foram realizados à pressão atmosférica em condições de não confinamento, utilizando ar à temperatura ambiente.

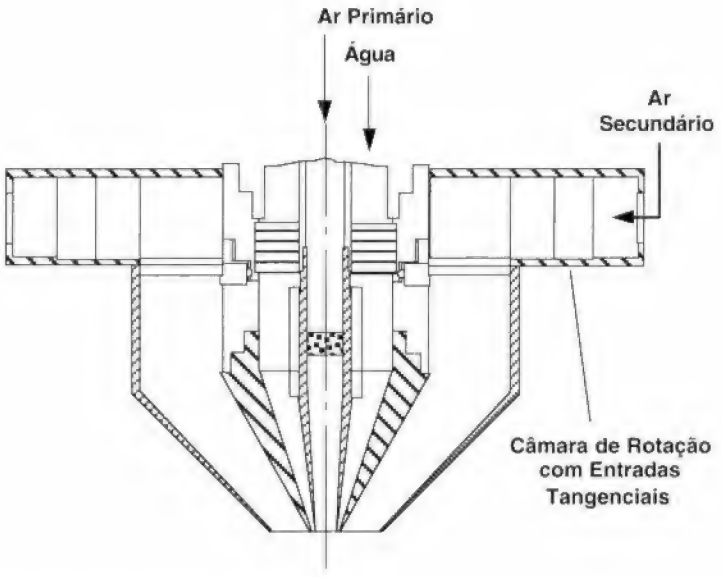


Fig. 2 Diagrama esquemático do atomizador.

2.2. Instrumentação

As técnicas de visualização utilizadas na análise de escoamentos a duas fases estão ilustradas na Figura 3 e incluem: i) "shadowgraphy", e; ii) o processamento de imagens (obtidas por câmara CCD) adquiridas após iluminação em contra-luz.

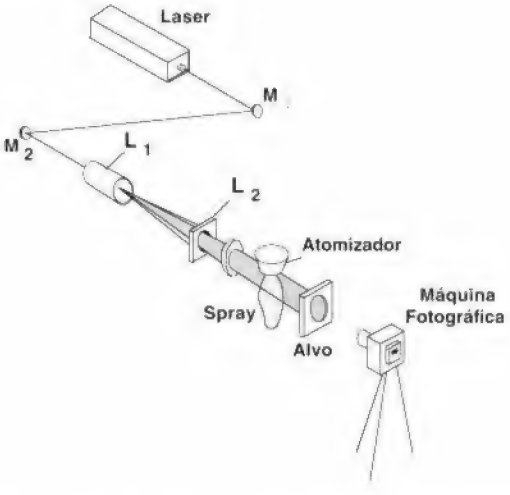


Fig. 3a) Diagrama de visualização utilizando a técnica de "Shadowgraphy".

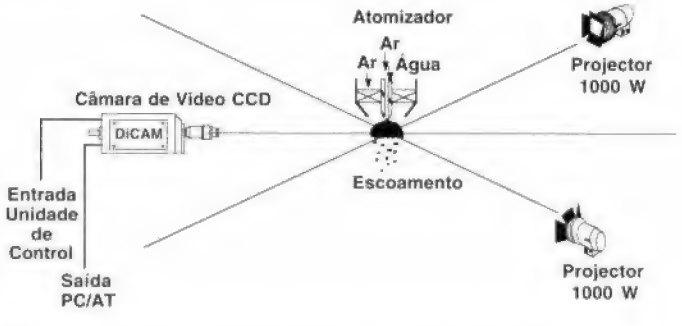


Fig. 3b) Representação do sistema de aquisição: iluminação / câmara

Para a visualização do escoamento a duas fases na região perto da saída do atomizador, recorreu-se a uma técnica de fotografia de contorno ("shadowgraphy" na literatura inglesa). Esta técnica baseia-se na identificação da derivada espacial do índice de refracção de um determinado escoamento, através da difracção de um feixe de luz paralela (Goldstein, 1983). Neste estudo analisou-se a zona na vizinhança da saída do atomizador recorrendo a uma câmara CCD (DiCAM 2) de 8 bits, ou com 256 níveis de cinzento, com uma resolução máxima de 768 pixels por linha (horizontal) e 240 pixels por campo (vertical). O sistema de aquisição inclui, ainda, uma unidade de controlo, um gerador de sinais ("trigger" externo), uma placa digitalizadora e um computador 486/66 MHz. Uma análise detalhada da precisão dos resultados encontra-se apresentada em Carvalho (1995).

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta secção apresentam-se alguns resultados obtidos de forma a analisar a influência do ar primário de atomização e do nível de rotação do ar secundário no processo de atomização a jusante do atomizador estudado. Numa fase anterior ao presente estudo caracterizaram-se os campos médio e turbulento de velocidades recorrendo a um velocímetro laser, encontrando-se analisados diversos escoamentos sem injecção de líquido (Carvalho e Heitor, 1993; 1996). Neste artigo a análise inclui a caracterização da região na vizinhança da saída do atomizador com o objectivo de identificar, detalhadamente, as várias etapas envolvidas no processo de desintegração do filme de líquido.

A análise aqui considerada recorre somente a resultados de visualização, sendo a sua apresentação efectuada de uma forma qualitativa e quantitativa, no que respeita à análise dos comprimentos de ruptura do filme de líquido. Foi seleccionado como escoamento de referência, o caso do jacto simples com uma espessura de filme de líquido de t = 0.7 mm, e caudal mássico, m_L = 10.8 g/s.

Efeito da Velocidade do Escoamento de Ar Interior, U_i, em L_b

A Figura 4 apresenta resultados característicos do escoamento a duas fases na vizinhança do atomizador utilizando "shadowgraphy" e análise por processamento de imagem. A figura mostra a desintegração do filme de líquido (espessura inicial, t = 0.7 mm) para o caso de um jacto simples (U_o = 0), com um caudal de líquido de m_L = 10.8 g/s e para uma velocidade de ar primário U_i = 40 m/s.

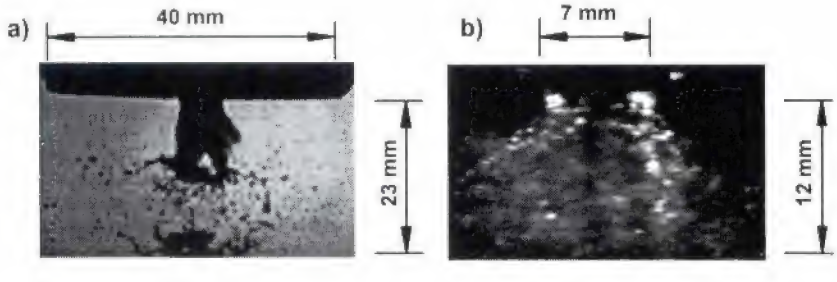


Fig. 4 Visualização da região vizinha do atomizador para jactos simples com t = 0.7 mm, m_L = 10.8 g/s e U_i = 40 m/s (U_o = 0).
a) "Shadowgraphy"; b) Imagem digitalizada e processada

É nítido da observação dos resultados de "shadowgraphy" a existência de um processo periódico associado ao mecanismo de ruptura do filme de líquido. Da análise detalhada de um conjunto de imagens, como as ilustradas na

Figura 4 retirou-se a informação necessária que permitiu a quantificação do comprimento de ruptura do filme de líquido, L_b, o qual foi medido como a distância entre a saída do atomizador e o ponto onde ocorre ruptura do filme.

A Figura 5 apresenta resultados obtidos com as duas técnicas de visualização usadas (para t = 0.7 mm e m_L = 10.8 g/s), verificando-se que os valores obtidos com a técnica de "shadowgraphy" sobreestimam os valores de L_b em cerca de 20%, relativamente à informação obtida por processamento de imagem devido a características inerentes à própria técnica (Carvalho, 1995). Os resultados mostram que à medida que a velocidade do ar primário aumenta, os comprimentos de ruptura decrescem devido a um aumento das forças de tensão aerodinâmicas que actuam no filme de líquido. Verifica-se que na gama de velocidades estudada, e para esta configuração em particular, L_b diminui com U_i de acordo com a relação $L_b \alpha U_i^{-1.15}$, para a visualização directa e de acordo com $L_b \alpha U_i^{-1.23}$, para a técnica de "shadowgraphy".

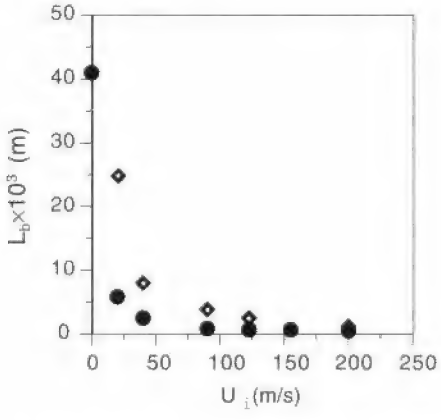


Fig. 5 Influência do ar de atomização, U_i, no comprimento de ruptura do filme de líquido, L_b, para t = 0.7 mm e m_L = 10.8 g/s (jacto simples).
◊ resultados obtidos por "Shadowgraphy"
• resultados obtidos por processamento de imagem

Efeito da Espessura do Filme de Líquido, t, em L_b

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para os comprimentos de ruptura do filme de líquido, L_b, para os jactos simples em função de U_i, para as duas espessuras de filme estudadas - 0.2 e 0.7 mm - e m_L = 10.8 g/s. O comprimento de ruptura aumenta para velocidades de ar decrescentes,

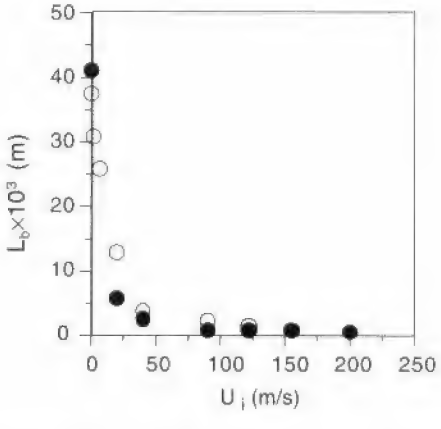


Fig. 6 Influência da velocidade do ar de atomização, U_i, no comprimento de ruptura do filme de líquido, para os jactos simples com m_L = 10.8 g/s.
• t = 0.7 mm; ○ t = 0.2 mm

observando-se uma deterioração substancial da qualidade de atomização para velocidades de ar muito reduzidas. Verifica-se ainda que o valor limite da velocidade do ar primário abaixo do qual a atomização se deteriora substancialmente se encontra próximo de 40 m/s, e que para valores de U_i inferiores se observa a ausência de atomização.

À medida que a velocidade do ar primário aumenta, os comprimentos de ruptura decrescem de um modo idêntico para ambas as configurações, notando-se, no entanto, que para o mesmo valor de U_i se obtêm comprimentos de ruptura inferiores para o filme de líquido de 0.7 mm de espessura. Embora esta diferença seja significativa para valores de U_i reduzidos, pode observar-se que L_b se torna independente da espessura do filme, t, para velocidades elevadas do ar primário.

Efeito do Caudal de Líquido, m_L, em L_b

A Figura 7 apresenta os comprimentos de ruptura, L_b, para os jactos simples em função de U_i, para uma espessura de filme, t = 0.2 mm, e para dois cau-

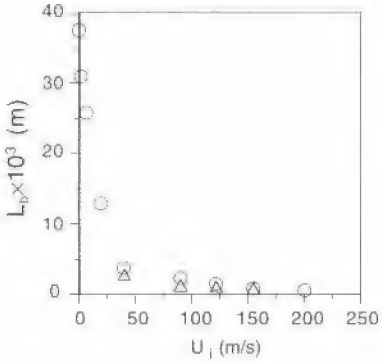


Fig. 7 Influência da velocidade do ar de atomização, U_i, no comprimento de ruptura do filme de líquido, L_b, para diferentes caudais mássicos de líquido (jactos simples)
t = 0.2 mm; D m_L = 5.8 g/s; m_L = 10.8 g/s

dais de líquido utilizados, nomeadamente: 5.8 e 10.8 g/s. Pode observar-se, tal como para as configurações anteriores, uma forte dependência do comprimento de ruptura com a velocidade do ar primário de atomização, principalmente na gama de valores reduzidos de U_i. No entanto, para ambas as espessuras do filme, verifica-se que para U_i > 122 m/s os valores de L_b se tornam independentes de t e de m_L. A Figura 8 apresenta os resultados da

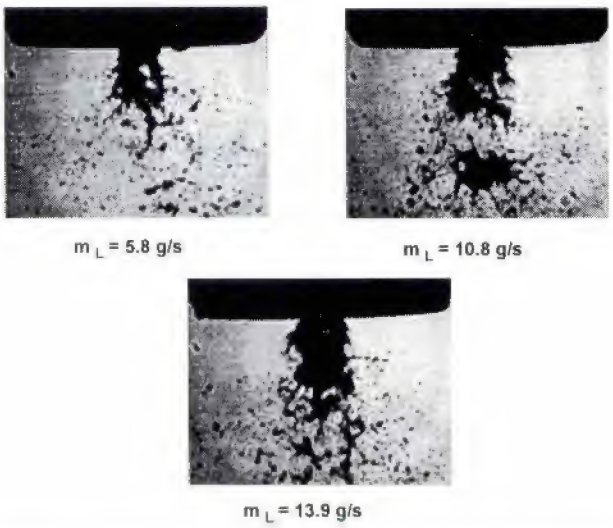


Fig. 8 "Shadowgraphy" da desintegração do filme de líquido para os jactos simples com t = 0.7 mm e U_i = 90 m/s (U_o = 0).

"shadowgraphy" para diferentes caudais de líquido mantendo U_i constante e igual a 90 m/s. Para velocidades de ar primário intermédias pode ainda observar-se a dependência de L_b com m_L: o comprimento de ruptura aumenta com o caudal mássico de líquido.

Efeito da Velocidade do Ar Exterior, U_o, em L_b

A Figura 9 apresenta os comprimentos de ruptura, L_b, para os jactos coaxiais em função de U_i, para as duas espessuras de filme estudadas, para um caudal de líquido de 10.8 g/s e velocidades do ar secundário, U_o, de 20 e 40 m/s. Pode, claramente, observar-se que o comprimento de ruptura diminui com U_o para ambas as espessuras do filme de líquido. A influência de um escoamento coaxial sem rotação é claramente observada atendendo aos resultados obtidos através da "shadowgraphy" da região vizinha da saída do atomizador, e que se encontram ilustrados na Figura 10.

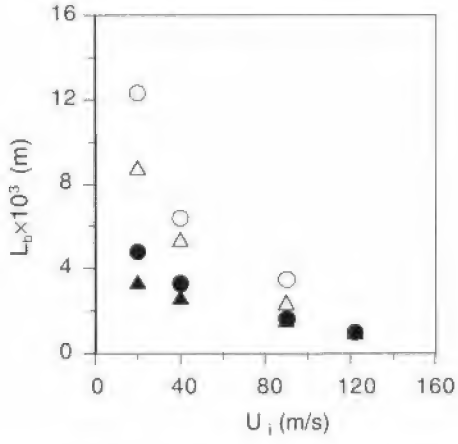


Fig. 9 Influência da velocidade do ar de atomização, U_i, no comprimento de ruptura do filme de líquido para jactos coaxiais sem rotação com m_L = 10.8 g/s.
t = 0.2 mm; ○ U_0 = 20; △ U_0 = 40 m/s
t = 0.7 mm; • U_0 = 20; ▲ U_0 = 40 m/s

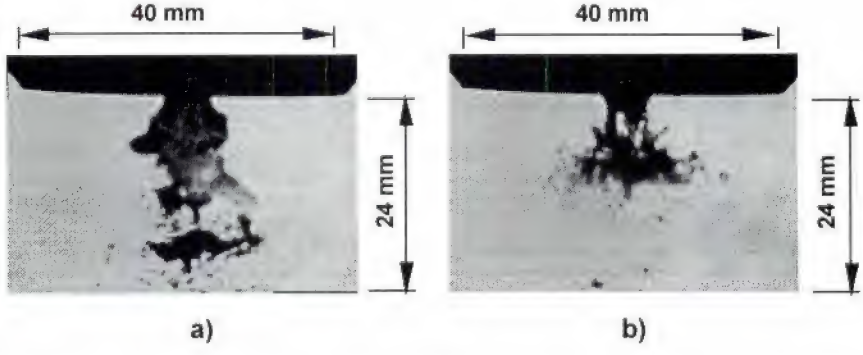


Fig. 10 "Shadowgraphy" da região da saída do atomizador (t = 0.7 mm; m_L = 10.8 g/s) para jactos coaxiais sem rotação (S = 0).
a) $U_i = U_0$ = 20 m/s; b) U_i = 20 m/s; U_o = 40 m/s

Efeito do Nível de Rotação do Ar Exterior, S, em L_b

A Figura 11 apresenta os resultados da visualização dos jactos coaxiais com rotação em função de U_i para t = 0.2 e 0.7 mm e m_L = 10.8 g/s. Tal como referido para as condições anteriores, à medida que a velocidade do ar primário aumenta, os comprimentos de ruptura decrescem notando-se, no entanto, que para o mesmo valor de U_i se obtêm comprimentos de ruptura substancialmente inferiores, para o filme de líquido de 0.2 mm de espessura,

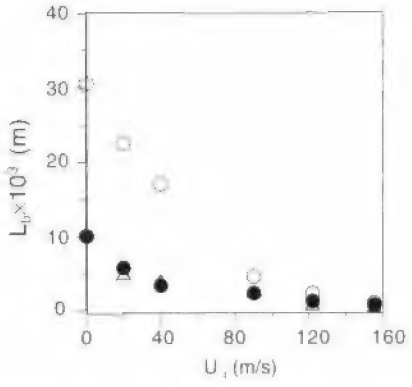


Fig. 11 Influência da velocidade do ar de atomização, U_i, no comprimento de ruptura do filme de líquido para os jactos coaxiais com rotação com m_L = 10.8 g/s.
t = 0.2 mm; ○ U_o = 20; △ U_o = 36 m/s
t = 0.7 mm; • U_o = 20 m/s

com diferentes níveis de rotação do ar exterior. Embora esta diferença seja significativa para valores de U_i reduzidos, pode observar-se que L_b se torna independente da espessura do filme, t, para valores de U_i suficientemente elevados.

As Figuras 12 a 14 permitem uma análise mais detalhada da influência do nível de rotação do ar secundário no processo de atomização para m_L = 10.8 g/s e U_i = 20; 90 e 122 m/s. Variando-se a velocidade e, conse-

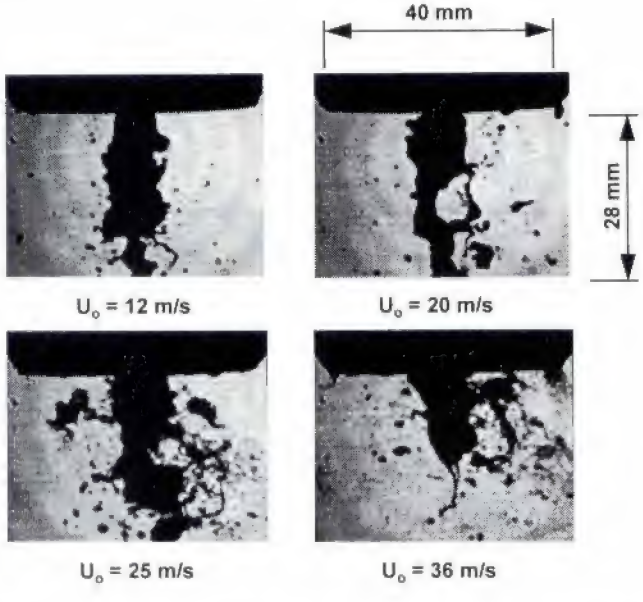


Fig. 12 "Shadowgraphy" da desintegração do filme de líquido para os jactos coaxiais com rotação - t = 0.7 mm; m_L = 10.8 g/s; U_i = 20 m/s.

quentemente, o nível de rotação do escoamento de ar exterior, observa-se que o processo de atomização é também condicionado por este parâmetro, sendo a "qualidade de atomização" (medida em termos da uniformidade da dimensão das gotas produzidas) superior para valores crescentes da velocidade e nível de rotação do ar secundário. Assim, e para valores de U_i reduzidos (ver Figura 12), pode observar-se que na região vizinha da saída do atomizador o filme de líquido apresenta alguma deformação para baixos valores de U_o (e.g., U_o = 12 m/s). Para valores crescentes de U_o, a influência do nível de rotação do ar exterior traduz-se não só por uma desintegra-

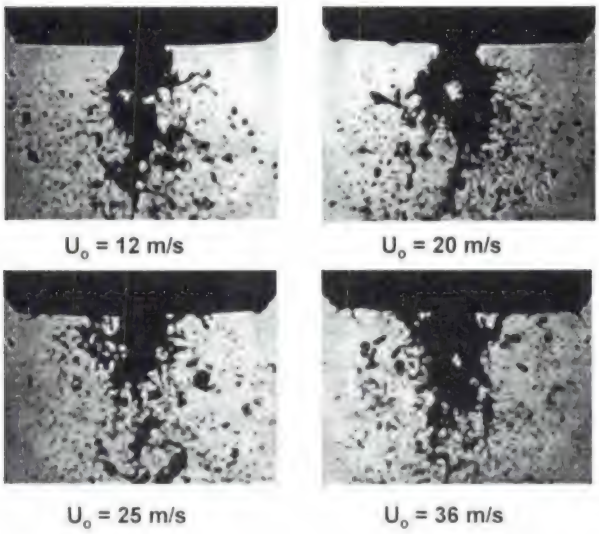


Fig. 13 "Shadowgraphy" da desintegração do filme de líquido para os jactos coaxiais com rotação - t = 0.7 mm; m_L = 10.8 g/s; U_i = 90 m/s.

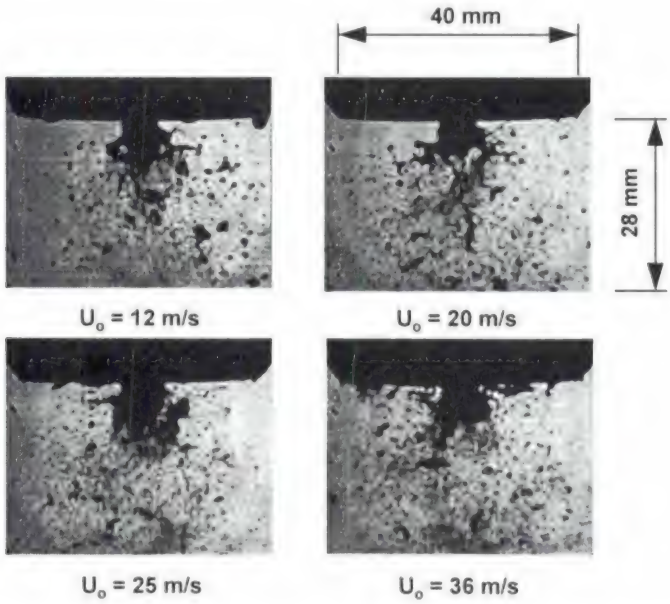


Fig. 14 "Shadowgraphy" da desintegração do filme de líquido para os jactos coaxiais com rotação - t = 0.7 mm; m_L = 10.8 g/s; U_i = 122 m/s.

ção mais rápida do filme de líquido, mas também pela formação de "clusters" e de ligamentos de elevado diâmetro. Para valores crescentes de U_i (ver Figuras 13 e 14), observa-se uma redução da região intacta de líquido perto da saída do atomizador acompanhada de uma redução da dimensão dos "clusters" e dos ligamentos de líquido. Para valores de U_i suficientemente elevados (ver Figura 14) é difícil observar a influência do nível de rotação no comprimento de ruptura sendo, apesar disso, evidente a maior taxa de abertura do escoamento associada aos níveis de rotação superiores.

Mecanismo e Regimes de Atomização

A complexidade do processo de desintegração de um filme de líquido em gotas advém do facto de nele estarem envolvidas diversas etapas. A importância relativa da contribuição de cada uma dessas etapas para a desintegração do filme depende das propriedades físicas, espessura, perfil de velo-

cidade, e características de turbulência do filme de líquido, da velocidade, densidade e caudal mássico do ar de atomização e, ainda, do modo como o ar de atomização colide com o filme de líquido. Também de importância crucial, é a geometria do atomizador, que pode determinar até que ponto a energia cinética e as características turbulentas da fase gasosa e líquida são efectivamente "captadas" de modo a conseguir condições de escoamento óptimas, do ponto de vista da atomização do filme de líquido, e a máxima interacção entre o filme de líquido e o ar.

Quando se analisa o escoamento de jacto simples, é evidente o aparecimento de um movimento radial simétrico que cresce em amplitude na direcção axial do escoamento, resultando no confinamento aerodinâmico do gás até uma distância de, aproximadamente, 4 diâmetros da saída do atomizador, seguindo-se uma região de separação das bolhas, de acordo com o observado por Kendall (1986). O escoamento sofre uma transição de um regime estacionário para um regime aqui designado de cíclico. A análise experimental e teórica de um escoamento deste tipo foi, pela primeira vez, efectuada por Kendall (1986) e Lee e Wang (1986), respectivamente, e mais recentemente por Lee e Chen (1991). De acordo com o observado, a teoria prevê uma taxa de amplificação muito superior para os escoamentos com núcleo gasoso comparativamente aos escoamentos com núcleo líquido.

De uma forma geral observa-se um comportamento semelhante ao descrito por Kendall (1986) e Lee e Chen (1991); o modo de Rayleigh ocorre para velocidades nulas do ar, podendo observar-se que a desintegração do filme de líquido ocorre para distâncias relativamente afastadas da saída do atomizador, quando comparada com os outros modos. Para reduzidos caudais de ar de atomização, observa-se a formação de "bolhas", de diâmetro aproximadamente igual a $1.8D_l$, em intervalos de tempo suficientemente reduzidos de modo a permitir a sua interligação até uma distância considerável do atomizador. Este regime ocorre e prevalece numa estreita gama de velocidades muito reduzidas do ar primário de atomização, sendo impossível definir um comprimento de ruptura do filme de líquido. O filme de líquido anular oscila axissimétrica e periodicamente, sendo facilmente deslocado no sentido preferencial do escoamento (da interface exposta à corrente) de maior velocidade. Quer o comprimento de onda, quer o comprimento de ruptura, dependem fortemente da velocidade da corrente gasosa.

Os resultados mostram que a deterioração do filme de líquido é afectada por *processos periódicos*, estando a formação de gotas dependente da transferência de quantidade de movimento entre o líquido e o ar de atomização. As principais frequências do processo são somente dependentes da velocidade do ar, sendo inferiores às frequências presentes no filme de líquido.

Os resultados permitem observar a influência dominante da velocidade do ar primário no processo de atomização. Para sucessivos aumentos da velocidade do escoamento de ar exterior, U_o, observa-se atomização através da formação de ligamentos que posteriormente se desintegram, dando origem a gotas de elevado diâmetro. Para elevados valores de U_l, verifica-se atomização instantânea e o valor de L_b mantém-se reduzido e aproximadamente constante para quaisquer acréscimos adicionais da velocidade de atomização.

Tal como se pode observar, a interligação de "bolhas" por filamentos, origina a formação subsequente de bolhas individuais. O gás "capturado" permanece retido no interior das bolhas durante o seu processo de formação, observando-se, por vezes, o escape de pequenas quantidades de líquido, o qual pode ser verificado pela formação de gotas satélite. Uma característica notável deste regime é o facto de pequeníssimas alterações do caudal de gás resultarem num processo de características irregulares. A análise numé-

rica de Lee e Wang (1986) prevê um diâmetro da bolha de 7.6 mm independente do caudal de ar.

A influência de um escoamento coaxial sem rotação é claramente observada através dos resultados da visualização da região vizinha da saída do atomizador, que se encontram ilustrados nas Figuras 15 e 16. Estas figuras

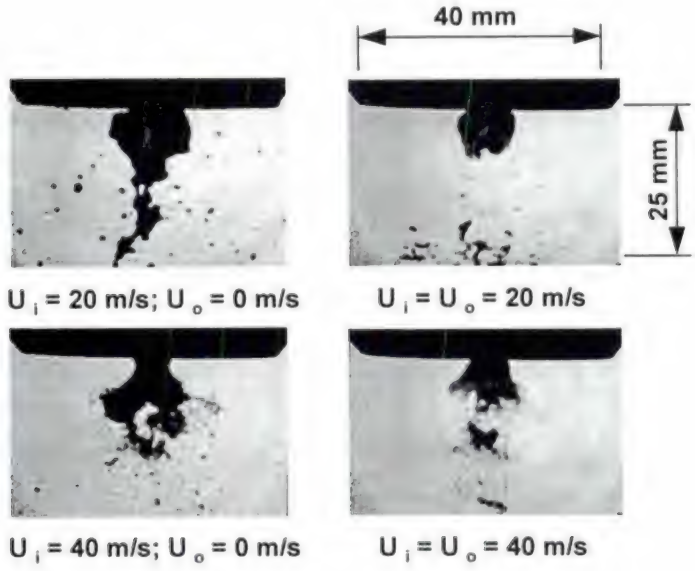


Figura 15 - "Shadowgraphy" da desintegração do filme de líquido para jactos simples e coaxias sem rotação (S = 0) - t = 0.7 mm; m_L = 5.8 g/s.

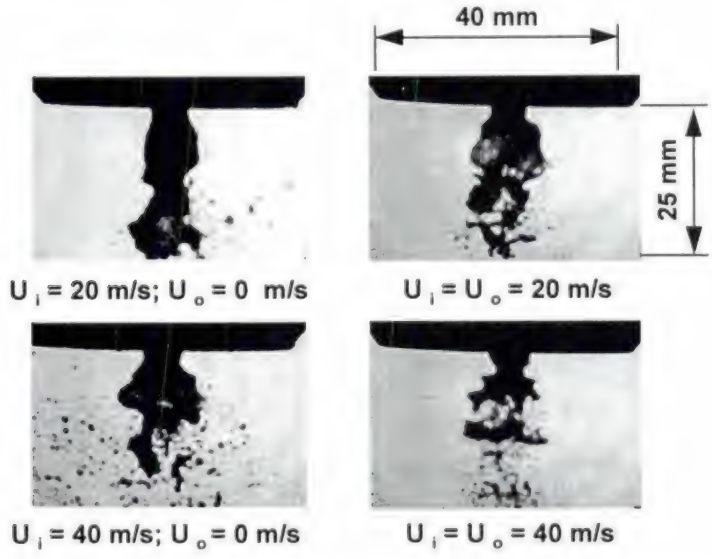


Figura 16 - "Shadowgraphy" da desintegração do filme de líquido para jactos simples e coaxias sem rotação (S = 0) - t = 0.7 mm; m_L = 13.9 g/s.

apresentam os resultados obtidos para os jactos simples e coaxiais sem rotação para t = 0.7 mm e diferentes caudais de líquido. Pode, claramente, observar-se que o comprimento de ruptura diminui com U_o. Para velocidades reduzidas de ar primário verifica-se a formação de uma bolha, devido às diferenças de pressão entre os escoamentos interior e exterior. A pressão exercida pelo escoamento envolvente e as forças de tensão superficial são

contrabalançadas pela pressão no interior da bolha. Esta pressão aumenta com a velocidade do ar primário e, eventualmente, torna-se superior à pressão total exercida pelo escoamento envolvente e forças de tensão superficial observando-se, então, o rebentamento da bolha na sua extremidade inferior.

Para valores de U_l superiores (> 40 m/s) não se observa a formação de bolhas, tornando-se o filme de líquido instável e conduzindo à formação de ligamentos que por sua vez se irão desintegrar em gotas. A formação destes ligamentos é induzida por instabilidades do filme de líquido e por forças de atrito entre o ar interior e o escoamento coaxial de líquido. Quanto mais elevada fôr a velocidade do ar primário, mais reduzido será o comprimento de ruptura, L_b, e menores serão os ligamentos formados, que consequentemente darão origem a gotas de menor diâmetro conduzindo a uma melhor qualidade de atomização. Neste caso, o processo de ruptura acima descrito pode ser analisado considerando que o filme de líquido se torna instável pela acção de forças aerodinâmicas, sendo aquelas instabilidades contrariadas pelas forças de tensão superficial.

De realçar é o facto de não existir qualquer definição concreta do comprimento de ruptura de um jacto ou filme de líquido (Faragó e Chigier, 1990; Eroglu et al., 1991; Mayer e Krulle, 1992; Mayer et al.,1992; Yule e Filipovic, 1992; e Lin e Hudman, 1994). O conceito está, então, sujeito a enorme subjectividade e, em grande parte, dependente do critério pessoal de cada investigador. Este facto é particularmente premente no que diz respeito a filmes de líquido cilíndricos e, consequentemente, à configuração em estudo ("prefilming airblast"), assistindo-se nos últimos anos a um esforço no sentido de estabelecer alguns critérios de uniformização do conceito, mas somente no que diz respeito a configurações mais simples (e.g., "plain-jet airblast").

4. CONCLUSÕES

O processo de desintegração do filme de líquido a jusante de um atomizador do tipo "airblast" com pré-filme é analisado, com enfâse no estudo da região na vizinhança da saída do atomizador de modo a permitir identificar os mecanismos envolvidos para diferentes condições de funcionamento. Os resultados mostram a presença de processos periódicos associados à desintegração do filme de líquido, para todas as configurações estudadas, sendo as frequências essencialmente dependentes da velocidade do ar primário (interior) de atomização.

Identificaram-se cinco regimes de atomização diferentes, nomeadamente: i) regime I, onde $U_l = 0$ e para o qual se observa o regime de Rayleigh; ii) regime II, $0 < U_l < 5$ m/s, caracterizado pela formação e deformação da "bolha" formada; iii) regime III, $5 < U_l < 40$ m/s, onde L_b decresce rapidamente à medida que U_l aumenta, tendo sido encontrados dois tipos de ruptura: ruptura do tipo filme/cluster/ligamento, para valores de U_l relativamente reduzidos, e ruptura do tipo ligamentos/dispersão/desintegração, para valores mais elevados de U_l; iv) regime IV, $40 < U_l < 120$ m/s, onde L_b decresce lentamente quando U_l aumenta, e; v) regime V, $U_l > 120$ m/s, caracterizado pela ocorrência de atomização instantânea, observando-se decréscimos muito lentos de L_b, que mantém sempre valores muito reduzidos, quando U_l aumenta. Observou-se ainda que qualquer perturbação aplicada à superfície interior do filme de líquido constitui um método mais eficiente de atomização, quando comparado com perturbações semelhantes aplicadas à interface exterior do líquido. No entanto, desde que $U_l > 40$ m/s o mecanismo de

desintegração do filme de líquido mantém-se, apesar da qualidade de atomização depender da velocidade U_l.

O trabalho inclui uma análise detalhada da dependência do comprimento de ruptura com a velocidade do ar primário, com a espessura do filme de líquido, com o caudal mássico de líquido e com a velocidade e nível de rotação do ar secundário verificando-se, para todas as configurações estudadas, que à medida que a velocidade do ar primário aumenta, os comprimentos de ruptura decrescem e que para $U_l \geq 155$ m/s os valores de L_b se tornam independentes de t e de m_L.

Para valores reduzidos da razão de velocidades ar/líquido, observa-se uma distorção do filme de líquido de acordo com a teoria de Rayleigh; posteriormente, um aumento da velocidade relativa origina uma deslocação do ponto de ruptura para montante e com comprimentos de onda menores; para sucessivos acréscimos da velocidade relativa, observa-se a formação de ligamentos que se separam da superfície do líquido, e para velocidades de ar primário superiores a 120 m/s observa-se a atomização quasi-instantânea do líquido à saída do atomizador. Para velocidades elevadas do ar primário, os resultados são independentes da velocidade do ar exterior, tal como referido anteriormente. Se bem que a qualidade de atomização esteja essencialmente dependente da velocidade do ar primário, em toda a gama de condições de funcionamento do atomizador estudado, pôde observar-se a existência de um mecanismo semelhante caracterizado pela existência de fenómenos periódicos.

AGRADECIMENTOS

O trabalho foi parcialmente financiado pelo Programa CIÊNCIA na forma de uma bolsa de doutoramento concedida pela JNICT. O trabalho foi ainda parcialmente financiado pelo programa Brite/Euram através do projecto "Low-Emission Combustion Technology", contracto NºAERO-0016-C(B), e pelo projecto de cooperação internacional "Improvement of Combustion Processes by Swirling Flows and Turbulent Recirculating Flames", contracto N.º C11-CT-91-0923 da DGXII da Comissão Europeia.
Agradece-se o apoio de Jorge Coelho na elaboração e inserção das figuras no texto.

REFERÊNCIAS

Camatte, P. (1992). Etude des Instabilites d'une Nappe Liquide de Geometrie Annulaire en Pulverisation Assistee. Ph.D. Thesis, Universite de Rouen, France.

Camatte, P. and Ledoux, M. (1990). Instability of an Annular Cylindrical Sheet Surrounded by Two Gaseous Flows. ILASS-EUROPE, 6th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 4-6 July, Pisa, Italy.

Camatte, P. and Ledoux, M. (1991). Airblast Atomization: Instability of an Annular Liquid Sheet Surrounded by Two Air Flows of Different Velocities. ICLASS-91, July, Gaithersburg, MD, USA.

Carvalho, I.S (1995). Atomização de Líquidos em Escoamentos Turbulentos com e sem Recirculação. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico.

Carvalho, I.S. and Heitor, M.V. (1993). Vortex Stability and Breakdown in Coaxial Turbulent Swirling Jets. 9th Symp. on Turbulent Shear Flows, 16-18 August, Kyoto, Japan.

Carvalho, I.S. e Heitor, M.V. (1996). Caracterização de jactos Coaxiais Turbulentos com e sem Recirculação. Submetido à Técnica.

Culick, Heitor and Whitelaw (1996). *Unsteady Combustion*. Editors: Culick, Heitor and Whitelaw, Kluwer Academic Publishers.

Eroglu, H., Chigier, N. and Faragó, Z. (1991). Coaxial Atomizer Liquid Intact Lengths. Phys. Fluids A, 3(2), pp.303-308.

Faragó, Z. and Chigier, N. (1990). Breakup of Coaxial Liquid Jets. ILASS-EUROPE, 6th Annual Conference on Liquid Atomisation and Spray Systems, 4-6 July, Pisa, Italy.

Goldstein, R.J. (1983). *Fluid Mechanics Measurements*. Hemisphere/Springer-Verlag.

Joos, F. and Pellischek, G. (1995). Low Emission Combuster Technology. *Advances in Engine Technology*. Ed. R. Dunker, European Commision Aeronautics Research Series, John Wiley & Sons, pp.105-152.

Kendall, J.M. (1986). Experiments on Annular Liquid Jet Instability and on the Formation of Liquid Shells. Phys. Fluids, 29(7), pp.2086-2094.

Lawn, C.J. (1987). *Principles of Combustion Engineering for Boilers*. Academic Press, Combustion Treatise.

Lee, C.P. and Wang, T.G. (1986). A Theoretical Model for the Annular Jet Instabillity. Phys. Fluids, 29(7), pp.2076-2085.

Lee, J.G. and Chen, L.D. (1991). Linear Stability Analysis of Gas-Liquid Interface. AIAA J., 29(10), pp.1589-1595.

Lefebvre, A.H. (1980). Airblast Atomization. Prog. Energy Combust. Sci., 6, pp.233--261.

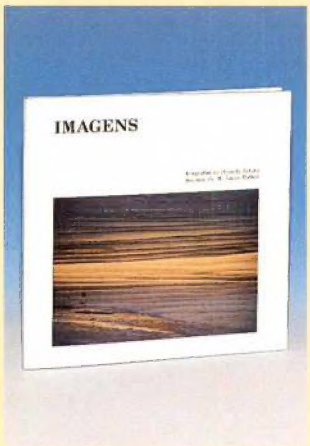
Lefebvre, A.H. (1983). *Gas Turbine Combustion*. McGraw-Hill Series in Energy, Combustion and Environment, Hemisphere Publishing Corporation.

Lefebvre, A.H. (1989). *Atomization and Sprays*. Combustion: An International Series, N. Chigier (ed.), Hemisphere Publishing Corporation.

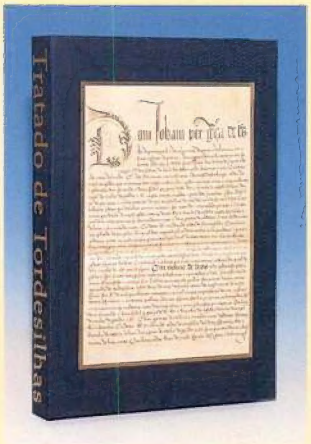
Lin, S.P. and Hudman, M.D. (1994). Regimes of Jet Breakup. ICLASS-94, Paper I-1, 18-22 July, Rouen, France.

Yule, A.J. and Filipovic, I. (1992). On the Break-Up Times and Lengths of Diesel Sprays. Intl. J. Heat Fluid Flow, 13(2), pp.197-206.

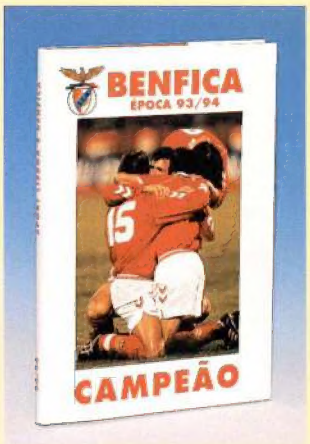
Zheng, Q.P. and Jasuja, A.K. (1994). Droplet Size and Velocity Correlations for a Coaxial Airblast Atomized Jet. ICLASS-94, Paper VI-10, 18-22 July, Rouen, France.



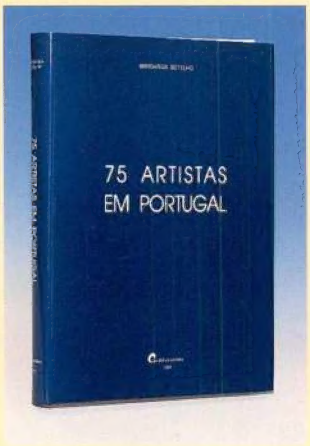
Título: **IMAGENS**
Autor: Orlando Batista (Fotografias)
M. Luísa Polleri (Poemas)
Formato: 31 × 29 cm
N.º de Páginas: 96
Encadernação: Capa cartonada com sobrecapa
***Esc.:* 6 500$00**



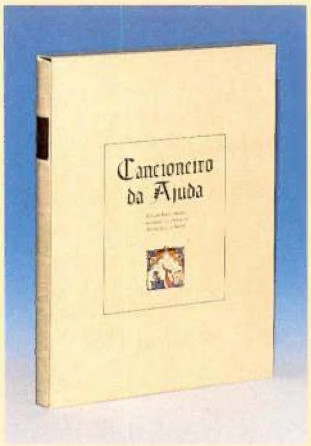
Título: **TRATADO DE TORDESILHAS**
Autor: Vasco Graça Moura, Luís Miguel Enciso Recio, Luís Adão da Fonseca, António Rumeu de Armas, Joaquim Veríssimo Serrão, Felipe Ruiz Martín
Formato: 22 × 30 cm
N.º de Páginas: 316 - 84 gravuras
Encadernação: Capa cartonada forrada a tecido
ISBN: 972-9157-30-8
***Esc.:* 24 150$00**



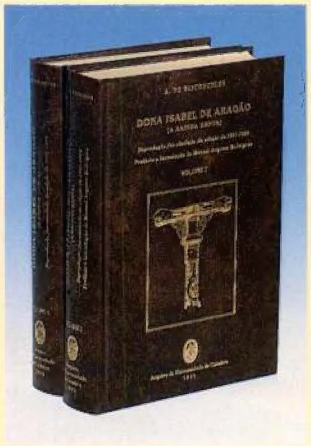
Título: **BENFICA CAMPEÃO**
Época 93/94
Autor: Rui Guedes
Formato: 22 × 31 cm
N.º de Páginas: 160
Encadernação: Capa cartonada com sobrecapa
ISBN: 972 - 9157 - 22 -7
***Esc.:* 5 000$00**



Título: **75 ARTISTAS EM PORTUGAL**
Autor: Margarida Botelho
Formato: 23 × 30 cm
N.º de Páginas: 312
Encadernação: Capa cartonada com sobrecapa
***Esc.:* 10 000$00**



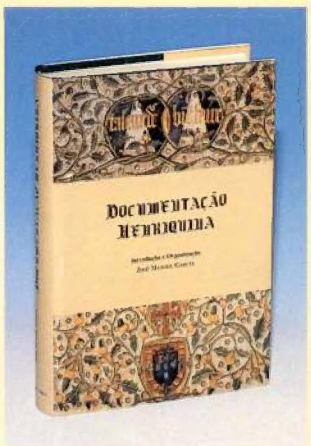
Título: **CANCIONEIRO DA AJUDA**
Edição Fac-similada do códice existente na Biblioteca da Ajuda
Formato: 35 × 45 cm
N.º de Páginas: 272
Encadernação: Capa cartonada e acondicionada num estojo
***Esc.:* 60 000$00**



Título: **DONA ISABEL DE ARAGÃO (A Rainha Santa)**
Autor: A. De Vasconcelos
Formato: 16 × 23 cm
N.º de Páginas: Vol. I - 690; Vol. II - 644
Encadernação: Capa cartonada e acondicionada num estojo
ISBN: 972 - 9157 - 29 - 4
***Esc.:* 17 500$00**

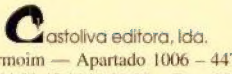
Título: **INVENTÁRIO ARTÍSTICO DE PORTUGAL - Distrito de Beja**
Autor: Túlio Espanca
Formato: 23 × 29,5 cm
N.º de Páginas: Vol. I - 342; Vol. II - 523
Encadernação: Capa em cartolina
***Esc.:* 27 000$00**

Título: **PEREGRINAÇÃO**
Autor: Fernão Mendes Pinto
Formato: 20 × 28 cm
N.º de Páginas: 644
Encadernação: Capa cartonada com sobrecapa
ISBN: 972 - 9157 - 23 - 5
***Esc.:* 5 500$00**



Título: **DOCUMENTAÇÃO HENRIQUINA**
Introdução e Organização: José Manuel Garcia
Formato: 20 × 28 cm
N.º de Páginas: 684
Encadernação: Capa cartonada com sobrecapa
ISBN: 972 - 9157 - 32 - 4
***Esc.:* 8 000$00**

FAÇA JÁ A SUA ENCOMENDA PARA: PLACE YOUR ORDER NOW TO:



Rua Padre Luís Campos, 686 – Vermoim — Apartado 1006 – 4471 MAIA Codex — PORTUGAL
Telef. (351-2) 944 82 45 / 948 88 05 – Fax (351-2) 948 77 07

GRÁFICA MAIADOURO, S.A.

35 anos a imprimir qualidade

profissionais qualificados

formação técnica

equipamento necessário

controlando todos os processos de produção

fazer grandes trabalhos em pouco tempo

estamos sempre na linha da frente

Apoiamo-nos numa equipa de profissionais qualificados com a adequada experiência e formação técnica.

Possuimos todo o equipamento necessário e amplas instalações que nos permite fazer grandes trabalhos em pouco tempo.

Livros e revistas, reproduções de obras de arte, catálogos, desdobráveis e cartazes, são a nossa actividade principal.

Estamos sempre na linha da frente das Artes Gráficas em Portugal, controlando todos os processos de produção com rigor e conhecimento dos grandes mestres.

A assinatura da Gráfica Maiadouro é a melhor garantia de um trabalho perfeito.

SEDE
Rua Padre Luís Campos, 686 - VERMOIM - Ap. 1006 - 4471 MAIA Codex
Tel. (02) 944 82 45 / 84 45 - 948 88 30 / 60 04 • Fax (02) 948 77 07

DELEGAÇÃO
Avenida Elias Garcia, 162 - 2.º Esq. - 1050 LISBOA
Tel. (01) 795 53 00 - 796 92 10 • Fax (01) 796 92 79